

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-161-170

УДК 616.314-089.23

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОЙ ОРТОДОНТИИ: ОТ ДИАГНОСТИКИ ДО ИЗГОТОВЛЕНИЯ АППАРАТОВ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Кравченко П. С.¹, Григоренко М. П.^{2,3}, Вакушина Е. А.⁴, Лапина Н. В.⁵, Демина К. Ю.^{4,7},
Мрикаева М. Р.⁶, Брагин А. Е.⁴, Григоренко П. А.^{2,3}

¹ Стоматологическая поликлиника №1, г. Ростов-на-Дону, Россия

² ООО «Ортодонтическая практика профессора Вакушиной», г. Ставрополь, Россия

³ АНО «Невинномысский медицинский институт», г. Невинномысск, Россия

⁴ Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

⁵ Кубанский государственный медицинский университет, г. Краснодар, Россия

⁶ Северо-Осетинская государственная медицинская академия, г. Владикавказ, Россия

⁷ Городская клиническая детская стоматологическая поликлиника, г. Ставрополь, Россия

Аннотация

В последние годы аддитивные технологии занимают все более значимое место в современной ортодонтии, обеспечивая переход от применения отдельных цифровых инструментов к единому клиничко-лабораторному циклу, включающему диагностику, виртуальное планирование, изготовление аппаратуры и контроль результатов лечения. В обзоре рассмотрены современные возможности интраорального сканирования, конусно-лучевой компьютерной томографии, трехмерной цефалометрии, искусственного интеллекта, CAD/CAM-технологий и 3D-печати на этапах диагностики, планирования и клинической реализации ортодонтического лечения. Показано, что интеграция цифровых методов позволяет повысить точность морфометрического анализа, улучшить оценку анатомических и функциональных параметров, а также повысить воспроизводимость клинических и лабораторных этапов. Особое внимание уделено применению аддитивных технологий при изготовлении элайнеров, ретейнеров, индивидуализированных конструкций с кортикальной опорой, а также аппаратов, используемых в комбинированном аппаратурно-хирургическом лечении. Отдельно рассмотрены вопросы цифровой оценки окклюзии, состояния височно-нижнечелюстного сустава, костных границ ортодонтического перемещения и возможностей искусственного интеллекта в автоматизации анализа изображений и поддержке клинических решений. Проанализированы материаловедческие аспекты 3D-печати, включая свойства полимерных и металлических материалов, параметры постобработки и ограничения клинического применения. Подчеркивается, что ключевой тенденцией является переход к непрерывному цифровому циклу, однако для 3D-печатных конструкций остаются недостаточно изученными биосовместимость, износостойкость и долговременная стабильность. Отмечается, что дальнейшее развитие аддитивных технологий в ортодонтии определяется не только расширением технологических возможностей, но и необходимостью накопления клинически верифицированных данных о точности, биосовместимости, долговременной стабильности и эффективности изготавливаемых конструкций.

Ключевые слова: ортодонтия, аддитивные технологии, 3D-печать, CAD/CAM, интраоральное сканирование, искусственный интеллект

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Павел Сергеевич КРАВЧЕНКО ORCID ID 0009-0006-9215-2504
врач-ортодонт, Стоматологическая поликлиника №1, г. Ростов-на-Дону, Россия
p.k.s.1998@mail.ru

Марк Павлович ГРИГОРЕНКО ORCID ID 0009-0005-2073-6562
к.м.н., врач-стоматолог-ортопед, Ортодонтическая практика профессора Вакушиной, г. Ставрополь, Россия; доцент кафедры стоматологии, Невинномысский медицинский институт, г. Невинномысск, Россия
mark115@yandex.ru

Елена Анатольевна ВАКУШИНА ORCID ID 0009-0006-3118-6559
д.м.н., профессор, заведующая кафедрой стоматологии детского возраста, Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия
mark115@yandex.ru

Наталья Викторовна ЛАПИНА ORCID ID 0000-0003-1835-8898
д.м.н., профессор, заведующая кафедрой ортопедической стоматологии, Кубанский государственный медицинский университет, г. Краснодар, Россия
kgta74@yandex.ru

Кристина Юрьевна ДЕМИНА ORCID ID 0009-0000-6439-5118
к.м.н., главный врач, Городская клиническая детская стоматологическая поликлиника; доцент кафедры стоматологии детского возраста, г. Ставрополь, Россия,
kristi_thebest@mail.ru

Мадина Руслановна МРИКАЕВА ORCID ID 0009-0003-0994-5924
к.м.н., доцент кафедры стоматологии №1, Северо-Осетинская государственная медицинская академия, г. Владикавказ, Россия
m.mrikaeva86@mail.ru

Александр Евгеньевич БРАГИН ORCID ID 0009-0008-5449-6386
к.м.н., доцент, доцент кафедры информационных и цифровых технологий, Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия
zagedan@mail.ru

Павел Анатольевич ГРИГОРЕНКО ORCID ID 0009-0006-3430-6341
к.м.н., доцент, врач-стоматолог-ортопед, главный врач ООО «Ортодонтическая практика профессора Вакушиной», г. Ставрополь, Россия; заведующий кафедрой стоматологии, Невинномысский медицинский институт, г. Невинномысск, Россия
mark115@yandex.ru

Адрес для переписки: Марк Павлович ГРИГОРЕНКО

355017, г. Ставрополь, ул. Мира 355/38, кв. 92
+7 (962) 4541018
mark115@yandex.ru

Образец цитирования:

Кравченко П. С., Григоренко М. П., Вакушина Е. А., Лапина Н. В., Демина К. Ю., Мрикаева М. Р., Брагин А. Е., Григоренко П. А. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОЙ ОРТОДОНТИИ: ОТ ДИАГНОСТИКИ ДО ИЗГОТОВЛЕНИЯ АППАРАТОВ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. Проблемы стоматологии. 2026; 2: 161-170.

© Кравченко П. С. и др., 2026
DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-161-170

Поступила 04.05.2026. Принята к печати 02.06.2026

DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-161-170

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MODERN ORTHODONTICS: FROM DIAGNOSIS TO APPLIANCE FABRICATION. A LITERATURE REVIEW

**Kravchenko P.S.¹, Grigorenko M.P.^{2,3}, Vakushina E.A.⁴, Lapina N.V.⁵, Dyomina K.Yu.^{4,7},
Mrikaeva M.R.⁶, Bragin A.E.⁴, Grigorenko P.A.^{2,3}**

¹ Dental polyclinic No. 1, Rostov-on-Don, Russia

² Professor Vakushina's Orthodontic Practice, Stavropol, Russia

³ Nevinnomyssk Medical Institute, Nevinnomyssk, Russia

⁴ Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia

⁵ Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia

⁶ North-Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russia

⁷ City clinical children's dental polyclinic, Stavropol, Russia

Abstract

In recent years, additive manufacturing has taken an increasingly significant place in modern orthodontics, enabling a transition from the use of individual digital tools to an integrated clinical and laboratory workflow that includes diagnosis, virtual planning, appliance fabrication, and treatment outcome monitoring. This review examines the current capabilities of intraoral scanning, cone-beam computed tomography, three-dimensional cephalometry, artificial intelligence, CAD/CAM technologies, and 3D printing at the stages of diagnosis, planning, and clinical implementation of orthodontic treatment. It is shown that the integration of digital methods improves the accuracy of morphometric analysis, enhances the assessment of anatomical and functional parameters, and increases the reproducibility of clinical and laboratory steps. Special attention is paid to the use of additive technologies in the manufacture of aligners, retainers, custom-made cortical-supported appliances, and devices used in combined surgical-orthodontic treatment. Separate sections address digital assessment of occlusion, the temporomandibular joint, bone boundaries for orthodontic tooth movement, and artificial intelligence capabilities in image analysis automation and clinical decision support. Material science aspects of 3D printing are analyzed, including the properties of polymeric and metallic materials, post-processing parameters, and clinical limitations. It is emphasized that the key trend is the shift towards a continuous digital cycle; however, for 3D-printed devices, biocompatibility, wear resistance, and long-term stability remain insufficiently studied. Further development of additive technologies in orthodontics is determined not only by expanding technological possibilities but also by the need to accumulate clinically verified data on accuracy, biocompatibility, long-term stability, and effectiveness of manufactured appliances.

Keywords: *orthodontics, additive technologies, 3D-printing, CAD/CAM, intraoral scanning, artificial intelligence*

The authors declare no conflict of interest

Pavel S. KRAVCHENKO ORCID ID 0009-0006-9215-2504
orthodontist, dental polyclinic No. 1, Rostov-on-Don, Russia
p.k.s.1998@mail.ru

Mark P. GRIGORENKO ORCID ID 0009-0005-2073-6562
PhD, dentist-orthopedist, "Professor Vakushina's Orthodontic Practice", Stavropol, Russia; Associate Professor of the Department of Dentistry,
Nevinnomyssk Medical Institute, Nevinnomyssk, Russia
mark115@yandex.ru

Elena A. VAKUSHINA ORCID ID 0009-0006-3118-6559
PhD, MD, DSc, Professor; Head of the Department of Pediatric Dentistry, Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
mark115@yandex.ru

Natalia V. LAPINA ORCID ID 0000-0003-1835-8898
PhD, MD, DSc, Professor; Head of the Department of Orthopedic Dentistry, Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia
kgma74@yandex.ru

Kristina Yu. DYOMINA ORCID ID 0009-0000-6439-5118
PhD, Head Physician, City clinical children's dental polyclinic, Associate Professor of the Department of Pediatric Dentistry, Stavropol, Russia
kristi_thebest@mail.ru

Madina R. MRIKAEVA ORCID ID 0009-0003-0994-5924
PhD, Associate Professor; Department of Dentistry No. 1, North-Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russia
m.mrikaeva86@mail.ru

Aleksandr E. BRAGIN ORCID ID 0009-0008-5449-6386
PhD, Associate Professor; Department of Information and Digital Technologies, Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
zagedan@mail.ru

Pavel A. GRIGORENKO ORCID ID 0009-0006-3430-6341
PhD, Associate Professor; chief physician, "Professor Vakushina's Orthodontic Practice", Stavropol, Russia; Head of the Department of Dentistry,
Nevinnomyssk Medical Institute, Nevinnomyssk, Russia
mark115@yandex.ru

Correspondence address: Mark P. GRIGORENKO
355/38 Mira st., App. 92, Stavropol, 355017, Russia
+7 (962) 454-10-18
mark115@yandex.ru

For citation:

Kravchenko P.S., Grigorenko M.P., Vakushina E.A., Lapina N.V., Dyomina K.Yu., Mrikaeva M.R., Bragin A.E., Grigorenko P.A.
ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MODERN ORTHODONTICS: FROM DIAGNOSIS TO APPLIANCE FABRICATION. A LITERATURE REVIEW. *Actual problems in dentistry.*
2026; 2: 161-170. (In Russ.)
© Kravchenko P.S et al., 2026
DOI: 10.18481/2077-7566-2026-22-2-161-170

Received 04.05.2026. Accepted 02.06.2026

Введение

В последние годы развитие ортодонтии тесно связано с внедрением аддитивных технологий, которые позволяют объединить диагностику, планирование лечения, изготовление аппаратуры и контроль результатов в единый клинико-лабораторный цикл. Если ранее цифровизация в основном ограничивалась получением трехмерных моделей зубных рядов и оптимизацией лабораторных этапов, то сегодня она позволяет создавать целостную виртуальную модель пациента, пригодную для морфометрического анализа, оценки биологических ограничений перемещения зубов, прогноза изменений мягкотканного профиля и изготовления индивидуализированных конструкций [3, 29].

К числу основных элементов этого подхода относятся: интраоральное сканирование, конусно-лучевая компьютерная томография, трехмерная цефалометрия, искусственный интеллект, CAD/CAM и аддитивные технологии. Клиническая значимость такого подхода определяется не отдельными устройствами или программами, а возможностью объединения получаемых данных в единую аналитическую систему. Именно согласованное использование оптической, лучевой, аналитической и производственной информации позволяет перейти от описательной диагностики к более воспроизводимому и управляемому планированию лечения [19, 49].

Искусственный интеллект ускоряет обработку изображений, автоматизирует сегментацию КЛКТ и идентификацию ориентиров, расширяет возможности аналитической поддержки врача. Однако результаты его работы по-прежнему требуют экспертной интерпретации, поскольку точность алгоритмов зависит от обучающих выборок, методов валидации и клинически значимых порогов ошибки [35, 42, 48, 53, 54].

Цифровая диагностика и интеграция данных

Интраоральное сканирование стало отправной точкой современного цифрового развития в ортодонтии. Оно позволяет быстро получать виртуальные модели зубных рядов, уменьшает практическую зависимость от традиционных оттисков, облегчает хранение и передачу данных и создает основу для последующего виртуального моделирования лечения [18, 40]. При этом интраоральное сканирование следует рассматривать не только как удобный клинический инструмент, но и как современный способ оценки параметров зубных рядов, обеспечивающий хорошую воспроизводимость результатов и высокую клиническую применимость [5, 15]. Сходный подход отражен и в отечественных учебно-методических изданиях, где 3D-цифровые методы рассматриваются как важный инструмент исследования зубов, зубных рядов и краниофациальных структур в ортодонтии и ортопедической стоматологии [7].

Систематические обзоры показывают, что трехмерные модели зубных рядов обладают достаточной точностью для ортодонтического планирования и изготовления аппаратуры, включая производство элайнеров [27, 44, 51, 55]. Их основные преимущества связаны с комфортом пациента, упрощением перехода к цифровому

моделированию и сокращением числа промежуточных этапов [27, 51]. В то же время точность сканирования зависит от клинической ситуации, протокола оптической регистрации, протяженности зубной дуги и опыта врача; наибольшая вероятность накопления ошибок отмечается в дистальных отделах зубных рядов и при выраженной скученности зубов во фронтальном отделе [44, 55].

Для полноценного ортодонтического планирования одной виртуальной модели зубного ряда недостаточно, поскольку необходимо учитывать положение корней, толщину кортикальных пластинок, объем альвеолярной кости и анатомические ограничения. По этой причине ключевую роль сохраняет КЛКТ, поскольку именно этот метод позволяет проводить трехмерную оценку зубочелюстной системы, состояния костной ткани и височно-нижнечелюстных суставов, особенно при скелетных аномалиях и деформациях, дефиците места, выраженных аномалиях положения зубов и подготовке к лечению с применением скелетной опоры [13, 22, 34].

В ряде случаев цифровая диагностика может быть дополнена электронной аксиографией, позволяющей объективно оценить траектории движений нижней челюсти и уточнить функциональные параметры у пациентов с суставной дисфункцией и нестабильным положением нижней челюсти [26, 61]. Дополнительное значение в таких случаях имеет и трехмерная морфометрическая оценка элементов ВНЧС по данным КЛКТ, позволяющая анализировать индивидуальные параметры головок нижней челюсти и их пространственные взаимоотношения [6].

Развитие цифровой ортодонтии определяется не только расширением набора методов обследования, но и возможностью их совместного использования в рамках единой виртуальной модели пациента. Совместное использование интраоральных сканов, КЛКТ, 3D-аксиографии и, при необходимости, трехмерного сканирования лица позволяет одновременно оценивать форму зубов, зубных рядов, положение корней, объем альвеолярной кости, пространственную ориентацию головы и особенности лицевой симметрии [26, 58]. Существенное значение при этом имеет фиксация естественного положения головы, поскольку именно она повышает воспроизводимость цефалометрического анализа и точность интерпретации аномалий и деформаций [14, 49]. В отечественной литературе уже описаны интегрированные протоколы, включающие КЛКТ черепа, интраоральное и лицевое сканирование при планировании комбинированного лечения [14]. Функциональное дополнение такой модели возможно за счет сопоставления 3D-биометрии виртуальных моделей челюстей с параметрами окклюзионного взаимодействия, включая время смыкания, количество интерференций, распределение нагрузок и баланс сторон, что повышает точность индивидуализированной оценки функционального состояния зубочелюстной системы [10].

Искусственный интеллект, 3D-цефалометрия и планирование лечения

Искусственный интеллект все активнее используется в ортодонтической диагностике как инструмент

автоматизированного анализа изображений и поддержки клинических решений. Наиболее изученной областью применения ИИ в ортодонтии в настоящее время является автоматическое определение цефалометрических ориентиров. Доказано, что алгоритмы нейросетевого обучения способны с высокой точностью идентифицировать значительную часть ориентиров на двумерных цифровых цефалограммах и сокращать время анализа, однако более строгие обзоры указывают, что часть оптимистичных выводов основана на грубых порогах ошибки и не всегда соответствует критериям клинически значимой точности [25, 35, 42, 46, 53, 56].

Для трехмерной цефалометрии ситуация остается более сложной. Значительная часть методик, обозначаемых как 3D-цефалометрия, фактически использует объемные данные КЛКТ как источник для последующих измерений на двумерных реформатах, а отсутствие стандартов при выборе ориентиров и референсных плоскостей затрудняет сопоставление результатов [4, 23, 24].

Сравнительные исследования показывают, что автоматизированная цифровая 3D-цефалометрия уже демонстрирует клинически приемлемые результаты, однако ее показатели все еще требуют сопоставления с ручным анализом и экспертной верификации [47]. Развитие систем автоматической 3D-цефалометрии указывает на возможность перехода от анализа отдельных линейных и угловых параметров к более целостной количественной и качественной оценке формы и взаимного расположения анатомических комплексов [61].

Еще одним значимым направлением является автоматизированная обработка КЛКТ-данных, поскольку определение границ зубов, корней, альвеолярной кости и анатомических ориентиров остается одним из наиболее трудоемких этапов подготовки данных к виртуальному моделированию. Использование искусственного интеллекта ускоряет этот процесс, уменьшает объем ручной подготовки и делает пространственную реконструкцию более доступной для клинической практики. Наибольший интерес представляют системы, сочетающие выделение анатомических структур и распознавание ориентиров в едином цифровом пространстве, особенно при подготовке к комбинированному ортодонт-хирургическому лечению, где принципиальное значение имеет оценка костных границ, определяющих биологические пределы ортодонтического перемещения [22, 41, 53, 62].

С клинической точки зрения особый интерес представляет использование ИИ как вспомогательного инструмента при выборе тактики лечения: обсуждаются модели, помогающие оценивать необходимость удаления зубов, выбирать между консервативным ортодонтическим и аппаратурно-хирургическим лечением, а также прогнозировать перемещения зубов и контролировать ход терапии прозрачными элайнерами [48, 50, 54, 57].

Практическая ценность такого подхода связана с тем, что при планировании перемещений необходимо учитывать положение зубов в кости, толщину кортикальных пластинок и параметры альвеолярного отростка. По данным отечественного исследования, трехмерная

оценка костной ткани позволяет более обоснованно составлять ортодонтический план, особенно при скученности зубов и необходимости изменения их инклинации, когда игнорирование костных границ снижает биологическую обоснованность перемещений [11].

Вместе с тем даже при высоком уровне автоматизации искусственный интеллект пока не может рассматриваться как замена клинического мышления врача и должен использоваться прежде всего как средство ускорения, стандартизации и углубления анализа на этапах подготовки данных к клинической интерпретации [16, 53].

CAD/CAM, 3D-печать и клиническая реализация цифрового проекта

Технологической основой цифрового производства в ортодонтии служат CAD/CAM-технологии, включающие получение трехмерных данных, виртуальное моделирование и последующее изготовление аппаратуры [19]. На производственном этапе принципиально важно различать субтрактивные и аддитивные методы: в первом случае изделие создается путем фрезерования, во втором — послойным формированием объекта с использованием технологий 3D-печати [17, 39]. Именно аддитивные технологии в последние годы наиболее заметно изменили ортодонтическую практику, позволив перейти от печати диагностических моделей к изготовлению собственно ортодонтических конструкций [43].

Наиболее наглядно технологические возможности CAD/CAM-подхода реализуются при изготовлении элайнеров и ретейнеров, где сканирование, виртуальное проектирование и изготовление объединены в единую последовательность [12]. Традиционный подход, основанный на печати моделей с последующим термоформованием прозрачного материала, сохраняет клиническую эффективность, однако включает несколько промежуточных стадий, каждая из которых может увеличивать риск технологических погрешностей. Именно поэтому прямая 3D-печать элайнеров рассматривается как перспективное направление, позволяющее сократить число этапов, уменьшить накопление ошибок и повысить точность воспроизведения заданной геометрии изделия [12, 43, 45, 52].

По данным обзоров, прямое изготовление элайнеров методом 3D-печати позволяет уменьшить зависимость от термоформования и повысить воспроизводимость геометрии конструкции. Вместе с тем клиническая состоятельность такого подхода определяется не только технологией печати, но и свойствами материала, его биосовместимостью, стабильностью в полости рта, параметрами постобработки и точностью реализации цифровой модели [52].

Отдельного рассмотрения заслуживает применение элайнеров у детей в сменном прикусе, где они используются не только в эстетических целях, но и как средство раннего ортодонтического лечения [33]. Показано, что у пациентов данной возрастной группы расширение зубных дуг в трансверсальной плоскости может достигаться с достаточно высокой предсказуемостью и без применения дополнительных аппаратов при условии

корректного планирования лечения, что особенно важно с учетом требований к комфорту и комплаентности [1].

Повышению предсказуемости элайнер-терапии способствует промежуточный цифровой контроль результатов лечения. Сопоставление текущих 3D-сканов с исходной трехмерной моделью позволяет своевременно выявлять расхождения с виртуальным планом и корректировать лечение до появления клинически значимых несоответствий [31].

Систематические обзоры также показывают, что 3D-печатные элайнеры могут превосходить термоформованные системы в точности геометрии и устойчивости формы, тогда как для ретейнеров и других внутриротовых конструкций принципиальное значение приобретают свойства применяемых материалов [43, 45]. Для ортодонтии это имеет принципиальное значение, поскольку качество каждого лабораторного этапа влияет на точность реализации плана лечения [12].

Возможности аддитивных технологий не ограничиваются изготовлением собственно ортодонтических аппаратов. Их применение охватывает и съемные армированные ретейнеры, в которых индивидуализированная внутренняя часть проектируется в CAD-системе и изготавливается методом фотополимерной 3D-печати, что способствует повышению точности, прочности и стабильности конструкции [8].

Особое место в цифровой ортодонтии занимает непрямая фиксация брекет-системы, поскольку ее эффективность определяется точностью переноса виртуально спланированного положения элементов в полость рта. Даже небольшое смещение одного брекета может влиять на вектор силы, снижать точность реализации запланированного перемещения и увеличивать необходимость последующих коррекций. По данным метаанализов, при непрямой фиксации брекет-системы ошибки клинического переноса аппаратуры в среднем не выходят за пределы клинически допустимого диапазона. Это подтверждает возможность достаточно точного воспроизведения виртуально заданного положения брекетов в клинических условиях [58].

Отдельного внимания заслуживают индивидуализированные аппараты с кортикальной опорой и металлические конструкции, проектируемые и изготавливаемые цифровыми методами. Современные цифровые протоколы позволяют сочетать КЛКТ, интраоральное сканирование, виртуальный выбор зоны установки мини-винтов, создание навигационных шаблонов и последующее моделирование гибридных расширяющих аппаратов [28, 37, 59]. К их числу можно отнести и персонализированные разобщающие центрирующие конструкции, изготавливаемые с использованием CAD/CAM-подхода, где внутренняя часть выполняется методом фрезерования, а наружная — методом термовакуумного штампования, что позволяет применять такие устройства для восстановления центрального соотношения челюстей и нормализации суставных взаимоотношений [9].

Особый интерес представляет применение цифровых протоколов при расширении верхней челюсти

с использованием скелетной опоры. По данным современных исследований, применение MARPE у подростков сопровождается не только зубоальвеолярными, но и выраженными скелетными изменениями, при этом расширение развивается по пирамидальному типу. При этом результат определяется не только наличием мини-имплантатов, но и качеством виртуального планирования, которое позволяет оценивать толщину кости по траектории введения винтов, выбирать число и расположение опорных элементов и адаптировать конструкцию аппарата к анатомическим условиям [37, 59].

В клинически более сложных случаях цифровое планирование особенно важно при аппаратурно-хирургическом расширении верхней челюсти (SARPE), а также при смежных протоколах, сочетающих кортикальную опору на мини-имплантатах и инвазивное хирургическое сопровождение, поскольку позволяет точнее определить конструкцию аппарата, объем вмешательства и анатомические условия расширения [32]. В комбинированном аппаратурно-хирургическом лечении непрерывный цифровой цикл — от диагностики и навигации до моделирования и изготовления аппарата — облегчает реализацию виртуального плана в операционной и повышает точность вмешательства [20, 21, 30, 36, 38].

Материалы, постобработка и ограничения цифрового производственного этапа

Выбор материалов и оценка их клинической пригодности остаются одним из принципиально важных, хотя нередко недооцениваемых аспектов аддитивного производства в ортодонтии. Эффективность готового устройства определяется не только точностью виртуального проекта, но и свойствами материала, параметрами изготовления и качеством постобработки. Это подтверждается как публикациями, посвященными 3D-печатным полимерным системам, так и исследованиями поверхности CAD/CAM-материалов, применяемых для изготовления окклюзионных шин [2, 39, 45]. Для полимерных ортодонтических конструкций особое значение имеют оптическая стабильность, изменение модуля упругости, водопоглощение, устойчивость к деформации и реакция на температурные колебания, тогда как при прямой 3D-печати важными остаются пространственное положение изделия, толщина слоя, режим очистки и параметры финальной полимеризации [12, 43, 45].

Особенно высоки требования к материалам внутриротовых конструкций длительного ношения, поскольку в полости рта они одновременно подвергаются воздействию влажности, температурных колебаний, механической нагрузки, пищевых красителей и микробной биопленки. Поэтому данные, полученные *in vitro*, не всегда позволяют достоверно прогнозировать поведение материала в полости рта. Для прозрачных конструкций значение имеют не только прочность и точность, но и сохранение эстетических свойств при длительном использовании, тогда как для металлических конструкций, изготовленных аддитивным методом, существенны устойчивость к коррозии и состояние поверхностного слоя [43, 45, 63].

Доступные публикации свидетельствуют о том, что доказательная база по 3D-печатным внутриротовым материалам пока остается недостаточной. Лучше всего изучены прозрачные фотополимеры для изготовления элайнеров и ретейнеров, однако данные об их износостойкости, биосовместимости, деградационных изменениях и долговременных механических свойствах остаются ограниченными [43, 45]. Немногочисленные сведения о металлических, аддитивно изготовленных ортодонтических конструкциях, хотя имеющиеся исследования показывают успешное сохранение базовых механических свойств при одновременном снижении устойчивости защитного оксидного слоя к локальной коррозии [63].

Следовательно, дальнейшее развитие цифровой ортодонтии требует перехода от демонстрации технологических возможностей к более строгой клинической оценке материалов, постобработки и долговременного функционирования готовых аппаратов [17, 39, 43, 45].

Заключение

Совокупность аддитивных технологий в современной ортодонтии позволяет рассматривать диагностику, планирование и изготовление аппаратуры как звенья единого клиничко-лабораторного процесса. Интраоральное скани-

рование и КЛКТ формируют пространственную основу виртуальной модели пациента, интеграция различных видов диагностических данных повышает точность анализа, искусственный интеллект расширяет прогностические возможности врача, а CAD/CAM-технологии и 3D-печать обеспечивают клиническую реализацию цифрового проекта в виде индивидуализированной конструкции.

Одной из ключевых тенденций современного этапа является переход от использования отдельных трехмерных решений к непрерывному клиничко-лабораторному циклу, в котором качество каждого последующего этапа определяется точностью предыдущего. Вместе с тем цифровые методы пока не исключают необходимости клинического экспертного контроля: для ИИ-цефалометрии и автоматической сегментации он по-прежнему остается обязательным, а для 3D-печатных материалов требуется более строгая оценка биосовместимости, износостойкости, эстетической стабильности и долговременных механических свойств. В конечном счете, именно степень клинической верификации, а не только технологическая новизна, будет определять дальнейшие перспективы развития аддитивных технологий в ортодонтии.

Литература/References

1. Афасижева А. А., Афасижев Т. М., Диданова А. Х. Ретроспективный клинический анализ эффективности расширения зубных дуг прозрачными элайнерами у пациентов детского возраста со смешанным прикусом. *Medicus*. 2025;(7):48–51. [Afasisheva A. A., Afasishev T. M., Didanova A. H. A retrospective clinical analysis of the effectiveness of dental arch expansion with transparent aligners in children with mixed bite. *Medicus*. 2025;(7):48–51. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82632044>
2. Апресян С. В., Степанов А. Г., Деев М. С., Гаджиев М. А., Бородин И. Д. Исследование поверхности образцов конструкционных материалов для изготовления окклюзионных шин с помощью CAD/CAM технологий. Институт стоматологии. 2022;(3):93–95. [Aprasyan S. V., Stepanov A. G., Deev M. S., Gadzhiev M. A., Borodina I. D. examination of the surface of samples of structural materials for the manufacture of occlusal tires using CAD/CAM technologies. *The Dental Institute*. 2022;(3):93–95. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49483819>
3. Апресян С. В., Степанов А. Г., Московец О. О., Малиева Э. А. Цифровое планирование ортодонтического лечения: литературный обзор. *Российский стоматологический журнал*. 2024;28(6):601–611. [Aprasyan S. V., Stepanov A. G., Moskovets O. O., Malieva E. A. Digital planning of orthodontic dental treatment: a literature review. *Russian Journal of Dentistry*. 2024;28(6):601–611. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/dent634964>
4. Аюпова И. О., Махота А. Ю., Колсанов А. В., Попов Н. В., Davidyuk M. A., Некрасов И. А. и др. Возможности методов цефалометрического анализа рентгенологических изображений в трехмерном пространстве (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2024;16(3):62–75. [Ayupova I. O., Makhota A. Yu., Kolsanov A. V., Popov N. V., Davidyuk M. A., Nekrasov I. A. et al. Capabilities of cephalometric methods to study x-rays in three-dimensional space (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2024;16(3):62–75. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.3.07>
5. Бородин И. Д., Григорянц Л. С., Гаджиев М. А., Апресян С. С., Батов Р. В., Степанов А. Г. и др. Сравнительная оценка точности отображения зубной дуги при помощи современных интраоральных 3D-сканеров. *Российский стоматологический журнал*. 2022;26(4):287–297. [Borodina I. D., Grigoryants L. S., Gadzhiev M. A., Aprasyan S. S., Batov R. V., Stepanov A. G. et al. Comparative evaluation of the accuracy of the dental arch display using modern intraoral three-dimensional scanners. *Russian Journal of Dentistry*. 2022;26(4):287–297. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-4-287-297>
6. Вакушина Е. А., Григоренко М. П., Григоренко П. А., Брагин Г. Е. Цифровая оценка особенностей топографии элементов височно-нижнечелюстного сустава у взрослых пациентов с дистальной окклюзией и целостными асимметричными зубными дугами, реализованная в программе «OnDemand3D Dental». *Ортодонтия*. 2025;(2):58. [Vakushina E. A., Grigorenko M. P., Grigorenko P. A., Bragin G. E. Digital assessment of topographic features of temporomandibular joint elements in adult patients with distal occlusion and intact asymmetric dental arches performed in the OnDemand3D Dental software. *Orthodontia*. 2025;(2):58. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89112964>
7. Григоренко М. П., Брагин Е. А., Вакушина Е. А. 3D-цифровые методы исследования в ортопедической стоматологии и ортодонтии: учебное пособие для студентов медицинских вузов. Ставрополь: Изд-во СтГМУ; 2024. 91 с. [Grigorenko M. P., Bragin E. A., Vakushina E. A. 3D digital research methods in prosthodontics and orthodontics: textbook for medical students. Stavropol: Publishing house of Stavropol State Medical University; 2024. 91 p. (In Russ.)].
8. Григоренко М. П., Григоренко П. А., Вакушина Е. А., Шарипов Р. Е. Разработка оригинального съемного армированного ретейнера, реализованного с применением CAD/CAM-технологий и фотополимерной 3D-печати. *Молодежный инновационный вестник*. 2025;14(S1):757–760. [Grigorenko M. P., Grigorenko P. A., Vakushina E. A., Sharipov R. E. Development of an original removable reinforced retainer, manufactured using CAD/CAM-technologies and photopolymer 3D-printing. *Molodezhnyy innovatsionnyy vestnik*. 2025;14(S1):757–760. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82825371>
9. Григоренко М. П., Вакушина Е. А., Брагин Е. А., Лапина Н. В., Григоренко П. А., Мрикаева М. Р. и др., авторы; ООО «Ортодонтическая практика профессора Вакушиной», патентообладатель. Съемный ортопедический разобщающий центрирующий протез. Российская Федерация патент на полезную модель РФ 231269. Опул. 21.01.2025. [Grigorenko M. P., Vakushina E. A., Bragin E. A., Lapina N. V., Grigorenko P. A., Mrikaeva M. R. et al., inventors; Professor Vakushina's Orthodontic Practice, LLC, assignee. Removable orthopedic disengaging centering prosthesis. Russian Federation patent RU 231269. Published 21.01.2025. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80279898>
10. Григоренко П. А., Григоренко М. П., Вакушина Е. А., Брагин Г. Е. Виртуальное изучение персонализированных 3D-показателей окклюзионных контактов и биометрии у пациентов с дистальной окклюзией, проведенное различными цифровыми методами. *Ортодонтия*. 2025;(2):59. [Grigorenko P. A., Grigorenko M. P., Vakushina E. A., Bragin G. E. Virtual study of personalized 3D indicators of occlusal contacts and biometrics in patients with distal occlusion performed using various digital methods. *Orthodontia*. 2025;(2):59. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89112965>
11. Данилова М. А., Дмитриенко И. В., Арутюнян Л. И. Изучение состояния костной ткани с помощью 3D-цефалометрии при ортодонтическом лечении элайнерами. *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2022;22(1):58–62. [Danilova M. A., Dmitrienko I. V., Arutyunyan L. I. 3D cephalometric assessment of bone tissue condition during the orthodontic treatment with clear aligners. *Pediatric Dentistry and Dental Prophylaxis*. 2022;22(1):58–62. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48202581>
12. Демьяненко С. А., Пенькова Я. Ю., Морозов А. Л. Цифровые технологии в ортодонтии на примере изготовления элайнеров: обзорная статья. *Российский стоматологический журнал*. 2025;29(1):79–88. [Demyanenko S. A., Penkova Y. Y., Morozov A. L. Aligner manufacturing as an example of digital technology in orthodontics: A review. *Russian Journal of Dentistry*. 2025;29(1):79–88. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/dent642024>
13. Дробышева Н. С., Маллаева А. Б., Петровская В. В., Дибирова П. Ш., Лежнев Д. А., Дробышева Л. А. Совершенствование протоколов анализа конусно-лучевых компьютерных томограмм ортодонтических пациентов. *Клиническая стоматология*. 2022;25(2):112–118. [Drobysheva N. S., Mallaeva A. B., Petrovskaya V. V., Dibirova P. Sh.,

- Lezhnev D. A., Drobysheva L. A. Improvement of the protocols for the analysis of cone-beam computed tomograms of orthodontic patients. *Clinical Dentistry*. 2022;25(2):112–118. (In Russ.). https://doi.org/10.37988/1811-153X_2022_2_112
14. Дробышев А. Ю., Изотов О. И., Свиридов Е. Г., Сорокина М. С., Тония Д. С., Шипика Д. В., авторы; Тония Д. С., Свиридов Е. Г., Шипика Д. В., Дробышев А. Ю., патентообладатели. Способ проведения цефалометрического анализа пациентов с аномалиями и деформациями челюстей на основании определения естественного положения головы, компьютерной томографии черепа, 3D-сканирования лица и интраорального сканирования. Российская Федерация патент RU 2839303. Оpubл. 29.04.2025. [Drobyshev A. Y., Izotov O. I., Sviridov E. G., Sorokina M. S., Tonia D. S., Shipika D. V., inventors; Tonia D. S., Sviridov E. G., Shipika D. V., Drobyshev A. Y., assignee. Method for cephalometric analysis of patients with abnormalities and deformations of jaws based on determining natural position of head, computed tomography of skull, 3d face scanning and intraoral scanning. Russian Federation patent RU 2839303. Date of publication: 29.04.2025. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82330805>
15. Дыбов А. М., Ли Цзининь, Гао Юйчэн, Дудник О. В. 3D-сканирования в диагностике и профилактике стоматологических заболеваний у детей. *Стоматология для всех*. 2025;(1):64–68. [Dybov A. M., Li Jining, Gao Yucheng, Dudnik O. V. 3D scanning in diagnostics and prevention of dental diseases in children. *International Dental Review*. 2025;(1):64–68. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82603306>
16. Игнатиева Л. А., Хамитова Н. Х., Петрищенко Е. Применение искусственного интеллекта в стоматологии. *Институт стоматологии*. 2025;(1):104–105. [Ignatieva L. A., Khamitova N. Kh., Petrishchenko E. The use of artificial intelligence in dentistry. *The Dental Institute*. 2025;(1):104–105. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82347052>
17. Карапетян А. А., Уханов М. М., Ряховский А. Н. 3D-печать из металлов в стоматологии. *Стоматология*. 2022;101(5):85–91. [Karapetyan A. A., Ukhanov M. M., Ryahovsky A. N. Metal 3D printing in dentistry. *Stomatology*. 2022;101(5):85–91. (In Russ.).] <https://doi.org/10.17116/stomat202210105185>
18. Колопова Н. Д., Гречишников Д. Р., Якубова М. Р., Шигапова А. Р., Маркосян А. Г., Бегу А. А. и др. Интраоральное сканирование: новый уровень точности и комфорта в стоматологии. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2025;(6). [Kolopova N. D., Grechishnikov D. R., Yakubova M. R., Shigapova A. R., Markosyan A. G., Begu A. A. et al. Intraoral scanning: a new level of precision and comfort in dentistry. *International Research Journal*. 2025;(6). (In Russ.).] <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.76>
19. Колпакова Д. Ю., Московский А. В., Уруков Ю. Н., Московская О. И. CAD/CAM-технологии. *Интраоральная визуализация. Здоровоохранение Чувашии*. 2023;(4):126–129. [Kolpakova D. Yu., Moskovskiy A. V., Urukov Yu. N., Moskovskaya O. I. CAD/CAM-technologies. *Intraoral imaging. Zdravoohranenie Chuvašii*. 2023;(4):126–129. (In Russ.).] <https://elibrary.ru/item.asp?id=60271859>
20. Колчин С. А., Дробышев А. Ю., Куракин К. А., Дибиров Т. М., Митерев А. А. Использование 3D-технологий при планировании ортогнатических операций у пациентов с аномалиями развития челюстей. *Эндодонтия Today*. 2022;20(2):183–188. [Kolchin S. A., Drobyshev A. Yu., Kurakin K. A., Dibirov T. M., Miterov A. A. The use of 3D technologies in the planning of orthognathic operations in patients with anomalies in the development of the jaws. *Endodontics Today*. 2022;20(2):183–188. (In Russ.).] <https://doi.org/10.36377/1726-7242-2022-2-189-196>
21. Колчин С. А., Дробышев А. Ю., Куракин К. А., Дибиров Т. М., Митерев А. А. Оценка точности послеоперационных результатов виртуального планирования хирургического этапа комбинированного лечения пациентов с гнатическими формами патологии прикуса. *Head and neck. Голова и шея. Российский журнал*. 2024;12(2):31–38. [Kolchin S. A., Drobyshev A. Yu., Kurakin K. A., Dibirov T. M., Miterov A. A. Assessing the accuracy of postoperative results of virtual planning of the surgical stage in the combined treatment of patients with gnathic forms of malocclusion. *Head and neck. Russian Journal*. 2024;12(2):31–38. (In Russ.).] <https://doi.org/10.25792/HN.2024.12.2.31-38>
22. Маммедов С. М., Берсанов Р. У., Мохаммад М. Ф., Алобайат А. Х. А., Такаева Л. С. Нейросетевой анализ конусно-лучевых КТ-изображений (КЛКТ) в стоматологии: систематический обзор, методические ориентиры и клинические сценарии применения. *Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки*. 2025;(4):62–68. [Mammedov S. M., Bersanov R. U., Mohammad M. F., Alobayat A. Kh. A., Takaeva L. S. Neural network analysis of cone-beam ct (CBCT) images in dentistry: a systematic review, methodological guidelines, and clinical application scenarios. *Vestnik KNII RAN. Seria "Estestvennye i tehničeskie nauki"*. 2025;(4):62–68. (In Russ.).] <https://doi.org/10.69537/VKNIRAN.2025.23.4.008>
23. Оборотистов Н. Ю., Врачева Д. Н. Применение цифровых технологий и 3D-цефалометрического анализа при планировании ортодонтического лечения и оценки эстетики лица. *Российская стоматология*. 2025;18(4):12–19. [Oborotistov N. Yu., Vracheva D. N. Using digital technologies and 3D cephalometric analysis in orthodontic treatment planning and facial aesthetics assessment. *Russian Journal of Stomatology*. 2025;18(4):12–19. (In Russ.).] <https://doi.org/10.17116/rossomat20251804112>
24. Оборотистов Н. Ю., Мураев А. А., Иванов С. Ю., Персин Л. С., Алешина О. А., Мокренко М. Е., Ершов М. В. и др. 3D-цефалометрия лица с применением искусственного интеллекта. *Ортодонтия*. 2023;(1):6–15. [Oborotistov N. Yu., Muraev A. A., Shiryaeva T. V., Ivanov S. Yu., Persin L. S., Oleshina O. A. et al. Optimization of the three-dimensional cephalometric analysis using deep machine learning. *Orthodontia*. 2023;(1):6–15. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54887102>
25. 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. *Orthodontia*. 2022;(4):15–20. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50253627>
26. Осипов Г. Г., Абрамянц А. А., Чикунев С. О., Гильманова Н. С., Михайлова М. В., Юдин Д. К. и др. Разработка полностью цифрового протокола планирования и реабилитации пациентов с заболеванием ВНЧС. *Институт стоматологии*. 2024;(1):23–25. [Osipov G. G., Abramyan A. A., Chikunov S. O., Gilmanova N. S., Mikhailova M. V., Yudin D. K. et al. Development of a fully digital protocol for planning and rehabilitation of patients with TMJ disease. *The Dental Institute*. 2024;(1):23–25. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65646861>
27. Овчаренко Е. Н., Зарединова Т. Р., Куртмулаева Л. Н., Тасинов А. Э., Тасинов Э. Э., Раупова Р. И. Интраоральное сканирование в современной стоматологии: преимущества, недостатки и перспективы развития. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2024;(3–2):121–126. [Ovcharenko E. N., Zaredinova T. R., Kurtmulaeva L. N. K., Tasinov A. E., Tasinov E. E., Raupova R. I. Intraoral scanning in modern dentistry: advantages, disadvantages, and development prospects. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;(3–2):121–126. (In Russ.).] <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2024/%E2%84%96603/2/a2647fd7-bcf6-dad58e1a1882>
28. Арсенина О. И., Попова Н. В., Попова А. В., Махортова П. И., Глухова Н. В., Козаченко В. Э. и др. авторы; Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, патентообладатель. Способ расширения верхней челюсти у пациентов с сужением верхней челюсти и ортодонтический аппарат для его реализации. *Российская Федерация патент RU 2766675*. Оpubл. 15.03.2022. [Arsenina O. I., Popova N. V., Popova A. V., Makhortova P. I., Glukhova N. V., Kozachenko V. E. et al. inventors; Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie Natsionalnyj meditsinskij issledovatel'skij tsentr "Tsentralnyj nauchno-issledovatel'skij institut stomatologii i chelyustno-litseye khirurgii" Ministerstva zdравooohraneniya Rossijskoj Federatsii, assignee. Method forexpansion of the upperjaw in patients with narrowing of the upper jaw and orthodontic apparatus for its implementation. *Russian Federation patent RU 2766675*. Date of publication: 15.03.2022. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48140872>
29. Рошин Е. М. Персонализированная цифровая ортодонтия: использование 3D-технологий для планирования и прогнозирования результатов лечения. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2024;(6–2):203–207. [Roshchin E. M. Personalized digital orthodontics: using 3D technologies to plan and predict treatment outcomes. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;(6–2):203–207. (In Russ.).] <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2024/%E2%84%96606/2/ebf2f831-df20-4a63-8e65-a7d23eece67ea>
30. Текучева С. В., Лосев Ф. Ф., Чолокава Т. Д., Скоробогатько Е. С., Клипа И. А., Каримова Ю. А. Планирование комплексного ортодонтно-хирургического лечения пациентов со скелетными формами зубочелюстных аномалий на основе применения цифровых 3D-технологий. *Стоматология*. 2025;104(6–2):84–93. [Tekucheva S. V., Losev F. F., Cholokava T. D., Skorobogatko E. S., Klipa I. A., Karimova I. A. Comprehensive orthodontic-surgical treatment planning for patients with skeletal dentofacial anomalies based on the digital 3D-technologies. *Stomatology*. 2025;104(6–2):84–93. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=86186648>
31. Тимчук Я. И., Титкова В. В. Оценка эффективности модернизированного подхода к лечению элайнерами с использованием 3D-мониторинга и референсных значений. *Стоматология. Эстетика. Инновации*. 2025;9(3):278–287. [Timchuk Ya., Titkova V. Evaluation of the effectiveness of a modernized approach to aligner treatment using 3D-monitoring and reference values. *Dentistry. Aesthetics. Innovations*. 2025;9(3):278–287. (In Russ.).] <https://doi.org/10.34883/PI.2025.9.3.005>
32. Фадеев Р. А., Ланина А. Н., Вишнева Н. В. MSARME — методика аппаратно-хирургического расширения верхней челюсти. *Институт стоматологии*. 2025;(1):38–41. [Fadееv R. A., Lanina A. N., Vishnyova N. V. MSARME — a method of miniscrew-surgically-assisted rapid maxillary expansion. *The Dental Institute*. 2025;(1):38–41. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82347031>
33. Федорова А. В., Солдатов В. С., Солдатова Л. Н., Иорданишвили А. К. Практичные аспекты применения элайнеров у детей. *Институт стоматологии*. 2024;(3):32–35. [Fedorova A. V., Soldatov V. S., Soldatova L. N., Jordanishvili A. K. Practical aspects of use of aligners in children. *The Dental Institute*. 2024;(3):32–35. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73733831>
34. Чибисова М. А., Хошевская И. А., Гончарова С. В. Возможности и особенности применения конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) в амбулаторной стоматологической практике при обследовании пациентов детского возраста. *Институт стоматологии*. 2022;(3):34–39. [Chibisova M. A., Hoshchevskaya I. A., Goncharova S. V. Features and features application of cone beam computed tomography (CBCT) in outpatient dental practice when examining pediatric patients. *The Dental Institute*. 2022;(3):34–39. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49483799>
35. Шкарин В. В., Македонова Ю. А., Ярыгина Е. Н., Вейсгейм Л. Д., Дьяченко Д. Ю., Гаврикова Л. М. Оценка диагностической возможности обученной нейросетевой модели в стоматологии. *Клиническая стоматология*. 2025;28(1):116–123. [Shkarin V. V., Makedonova Yu. A., Iarygina E. N., Veisgeim L. D., Dyachenko D. Yu., Gavrikova L. M. Evaluation of the diagnostic capability of a trained neural network model in dentistry. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2025;28(1):116–123. (In Russ.).] https://doi.org/10.37988/1811-153X_2025_1_116

36. Alhabshi M. O., Aldhohayan H., BaEissa O. S., Al Shehri M. S., Alotaibi N. M., Almubarak S. K. et al. Role of three-dimensional printing in treatment planning for orthognathic surgery: a systematic review. *Cureus*. 2023;15(10): e47979. <https://doi.org/10.7759/cureus.47979>
37. André C. B., Pasqua B. P.M., Jacquier G. A., Nascimento F. D. Miniscrew-assisted rapid palatal expansion (MARPE): factors influencing planning. *Dental Press Journal of Orthodontics*. 2024;29(3): e242439. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.29.3.e242439.oar>
38. Badiali G., Bevini M., Gulotta C., Lunari O., Incerti Parenti S., Pironi M. et al. Three-dimensional cephalometric outcome predictability of virtual orthodontic-surgical planning in surgery-first approach. *Progress in Orthodontics*. 2022;23(1):51. <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00448-x>
39. Chen Y., Wei J. Application of 3D printing technology in dentistry: a review. *Polymers*. 2025;17(7):886. <https://doi.org/10.3390/polym17070886>
40. Christopoulou I., Kaklamanos E. G., Makrygiannakis M. A., Bitsanis I., Perlea P., Tsolakis A. I. Intraoral scanners in orthodontics: a critical review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(3):1407. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031407>
41. Cui Z., Fang Y., Mei L., Zhang B., Yu B., Liu J. et al. A fully automatic AI system for tooth and alveolar bone segmentation from cone-beam CT images. *Nature Communications*. 2022;13(1):2096. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29637-2>
42. Dipalma 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>
43. Dubey S., Prasad Dash B., Mohanty B., Jena S., Sahoo N., Singh S. 3D printing in orthodontics — past, present and future: a systematic review and meta-analysis. *Bioinformatics*. 2025;21(6):1766–1774. <https://doi.org/10.6026/973206300211766>
44. Eggmann F., Blatz M. B. Recent advances in intraoral scanners. *Journal of Dental Research*. 2024;103(13):1349–1357. <https://doi.org/10.1177/00220345241271937>
45. Goracci C., Juloski J., D'Amico C., Balestra D., Volpe A., Juloski J. et al. Clinically relevant properties of 3D printable materials for intraoral use in orthodontics: a critical review of the literature. *Materials*. 2023;16(6):2166. <https://doi.org/10.3390/ma16062166>
46. Hendrickx J., Gracea R. S., Vanheers M., Winderickx N., Preda F., Shujaat S. et al. Can artificial intelligence-driven cephalometric analysis replace manual tracing? A systematic review and meta-analysis. *European journal of orthodontics*. 2024;46(4): cjae029. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae029>
47. Khabadze Z., Mordanov O., Shilyaeva E. Comparative analysis of 3D cephalometry provided with artificial intelligence and manual tracing. *Diagnostics*. 2024;14(22):2524. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14222524>
48. Kazimierczak N., Kazimierczak W., Serafin Z., Nowicki P., Nożewski J., Janiszewska-Olszowska J. AI in orthodontics: revolutionizing diagnostics and treatment planning — a comprehensive review. *Journal of Clinical Medicine*. 2024;13(2):344. <https://doi.org/10.3390/jcm13020344>
49. Liu J., Hao J., Lin H., Pan W., Yang J., Feng Y. et al. Deep learning-enabled 3D multimodal fusion of cone-beam CT and intraoral mesh scans for clinically applicable tooth-bone reconstruction. *Patterns*. 2023;4(9):100825. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100825>
50. Liu J., Zhang C., Shan Z. Application of artificial intelligence in orthodontics: current state and future perspectives. *Healthcare*. 2023;11(20):2760. <https://doi.org/10.3390/healthcare11202760>
51. Mohammed Alassiry A. Clinical aspects of digital three-dimensional intraoral scanning in orthodontics — a systematic review. *Saudi Dental Journal*. 2023;35(5):437–442. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.04.004>
52. Narongdej P., Hassanpour M., Alterman N., Rawlins-Buchanan F., Barjasteh E. Advancements in direct aligner fabrication: a comprehensive review of direct-3D printing technologies. *Polymers*. 2024;16(3):371. <https://doi.org/10.3390/polym16030371>
53. Nordblom N. F., Büttner M., Schwendicke F. Artificial intelligence in orthodontics: critical review. *Journal of Dental Research*. 2024;103(6):577–584. <https://doi.org/10.1177/00220345241235606>
54. Olawade D. B., Leena N., Egbon E., Rai J., Mohammed A. P.E.K., Oladapo B. I. et al. AI-driven advancements in orthodontics for precision and patient outcomes. *Dentistry Journal*. 2025;13(5):198. <https://doi.org/10.3390/dj13050198>
55. Pellitteri F., Albertini P., Vogrig A., Spedicato G. A., Siciliani G., Lombardo L. Comparative analysis of intraoral scanners accuracy using 3D software: an in vivo study. *Progress in Orthodontics*. 2022;23(1):21. <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00416-5>
56. Polizzi A., Leonardi R. Automatic cephalometric landmark identification with artificial intelligence: an umbrella review of systematic reviews. *Journal of Dentistry*. 2024;146:105056. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105056>
57. Ruiz D. C., Mureşanu S., Du X., Elgarba B. M., Fontenele R. C., Jacobs R. Unveiling the role of artificial intelligence applied to clear aligner therapy: a scoping review. *Journal of Dentistry*. 2025;154:105564. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105564>
58. Sabbagh H., Khazaei Y., Baumert U., Hoffmann L., Wichelhaus A., Janjic Rankovic M. Bracket transfer accuracy with the indirect bonding technique — a systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*. 2022;11(9):2568. <https://doi.org/10.3390/jcm11092568>
59. Schobben R. R.P., Rangel F. A., Bruggink R., Crins-de Koning M. L.D., Bronkhorst E. M., Ongkosuwito E. M. Two experimental methods to integrate intra-oral scans into 3D stereophotogrammetric facial images. *Clinical Oral Investigations*. 2025;29(1):54. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-06138-8>
60. Siddhisaributr P., Khlongwanitchakul K., Anuwongnukroh N., Manopatanakul S., Viwattanapita N. Effectiveness of miniscrew assisted rapid palatal expansion using cone beam computed tomography: a systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Orthodontics*. 2022;52(3):182–200. <https://doi.org/10.4041/kjod21.256>
61. Talmaceanu D., Bolog N., Leucuta D., Tig I. A., Buduru S. Diagnostic use of computerized axiography in TMJ disc displacements. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2022;23(3):213. <https://doi.org/10.3892/etm.2022.11137>
62. Tanikawa C., Nakamura H., Mimura T., Uemura Y., Yamashiro T. Development of artificial intelligence-supported automatic three-dimensional surface cephalometry. *Orthodontics & Craniofacial Research*. 2025;28(4):636–646. <https://doi.org/10.1111/ocr.12914>
63. Wang H., Minnema J., Batenburg K. J., Forouzanfar T., Hu F. J., Wu G. Multiclass CBCT image segmentation for orthodontics with deep learning. *Journal of Dental Research*. 2021;100(9):943–949. <https://doi.org/10.1177/00220345211005338>
64. Zinelis S., Polychronis G., Papadopoulos F., Kokkinos C., Economou A., Panayi N. et al. Mechanical and electrochemical characterization of 3D printed orthodontic metallic appliances after in vivo ageing. *Dental Materials*. 2022;38(11):1721–1727. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.09.002>