

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ
REVIEW ARTICLE<https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.5.DENT.1>
УДК 616.314-089.28:004.9:621

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННОГО ПРОТЕЗИРОВАНИЯ

А.В. Иващенко, Д.Д. Огурцов, А.Б. Эреджепов, В.П. Тлустенко

Самарский государственный медицинский университет, ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара, 443099, Россия

Резюме. *Обоснование.* Традиционные методы зубного протезирования характеризуются погрешностью прилегания конструкций 100–200 мкм, длительностью изготовления 2–6 недель и частотой послеоперационных осложнений 15–40%. Цифровые технологии – CAD/CAM-системы, интраоральное сканирование, аддитивное производство – представляют парадигмальный сдвиг в ортопедической стоматологии, однако систематизированные данные об их клинической эффективности и экономической целесообразности остаются фрагментарными. Цель: провести систематический анализ точности, клинической эффективности и экономических показателей цифровых технологий в ортопедическом протезировании в сравнении с традиционными методами. Материалы и методы. Систематический обзор выполнен согласно протоколу PRISMA. Поиск проводился в базах PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane Library (2013–2023 гг.). Включено 47 исследований: 23 рандомизированных контролируемых исследования, 18 проспективных когортных исследований, 6 систематических обзоров с мета-анализом. Совокупная выборка: 6 284 пациента, 8 917 протезов. Первичные конечные точки: точность прилегания (мкм), время изготовления (дни), частота осложнений (%). Вторичные конечные точки: удовлетворенность пациентов (OHIP-14), стоимость протеза (евро), коррекционные визиты. Качество исследований оценивалось по шкалам Cochrane Risk of Bias Tool 2.0 и Newcastle-Ottawa. Статистический анализ: взвешенные средние различия с 95% доверительными интервалами, мета-регрессия (RevMan 5.4, Stata 17.0). *Результаты.* Цифровые технологии обеспечили сокращение погрешности краевого прилегания с 127,5 мкм до 34,2 мкм (взвешенная средняя разница –93,3 мкм; 95% ДИ: –102,1 до –84,5; $p<0,001$), что соответствует 73,2% относительному улучшению. Наилучшие результаты получены для монолитных циркониевых коронок CAD/CAM-фрезерования: 23,1 мкм против 134,2 мкм ($p<0,001$). Медиана сроков изготовления несъемных протезов сократилась с 14 до 2 дней ($p<0,001$). Технология chairside CAD/CAM обеспечила завершение протезирования за один визит в 78% случаев (среднее время 87 ± 23 минуты). Частота воспалительных осложнений через 12 месяцев снизилась с 14,8% до 6,2% (относительный риск 0,42; 95% ДИ: 0,31–0,57; $p<0,001$). Частота дисфункции височно-нижнечелюстного сустава уменьшилась с 8,9% до 3,4% (относительный риск 0,38; $p=0,001$). Вторичный кариес развился в 2,8% случаев против 9,4% при традиционном протезировании (относительный риск 0,30; $p<0,001$). Кумулятивная выживаемость несъемных протезов через 24 месяца составила 96,8% для цифровых против 92,3% для традиционных конструкций ($p=0,002$). Средний балл по шкале OHIP-14: $41,2\pm 6,3$ против $35,7\pm 8,1$ балла (разница 5,5; 95% ДИ: 4,2–6,8; $p<0,001$). Период адаптации к съемным протезам сократился с 16,8 до 4,2 дня ($p<0,001$). Себестоимость одиночной коронки снизилась с 280 до 195 евро (экономия 30,4%). Экономическая эффективность достигается при месячном потоке ≥ 12 протезов с безубыточностью через 18–24 месяца. Барьеры внедрения: стоимость оборудования 109 500–128 400 евро, кривая обучения с достижением оптимальной точности после >100 процедур, постобработка 3D-печатных конструкций в 11,3% случаев, артефакты сканирования при поддесневых препарированиях в 8,4% случаев. Мета-регрессия выявила улучшение точности на 0,142 мкм с каждой дополнительной процедурой ($p=0,003$). *Выводы.* Цифровые технологии демонстрируют статистически и клинически значимое превосходство над традиционными методами по точности прилегания (улучшение на 73,2%), времени изготовления (сокращение в 7 раз), частоте осложнений (снижение на 58–70%), качеству жизни пациентов и при определенных условиях – экономическим показателям. Оптимальная рентабельность достигается в клиниках с потоком ≥ 12 протезов/месяц. Критически важны структурированные образовательные программы для преодоления кривой обучения, стандартизация протоколов и обеспечение равного доступа к технологиям.

Ключевые слова: цифровая стоматология [D003813]; CAD/CAM-системы [D017076]; интраоральное сканирование [D003758]; зубное протезирование [D011475]; диоксид циркония [D015040]; 3D-печать [D066330]; краевое прилегание [D019232]; клиническая эффективность [D016896]; систематический обзор [D000078182]; метаанализ [D015201]; качество жизни [D011788]; анализ эффективности затрат [D003362].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Для цитирования: Иващенко А.В., Огурцов Д.Д., Эреджепов А.Б., Тлустенко В.П. Цифровые технологии в ортопедической стоматологии: систематический анализ эффективности индивидуализированного протезирования. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2025;15(5):232–248. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.5.DENT.1>



DIGITAL TECHNOLOGIES IN PROSTHETIC DENTISTRY: A SYSTEMATIC ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF INDIVIDUALIZED PROSTHODONTICS

Anton V. Ivashchenko, Daniil D. Ogurtsov, Aziz B. Eredzhepov, Valentina P. Tlustenko

Samara State Medical University, Chapaevskaya St., 89, Samara, 443099, Russia

Abstract. *Background.* Traditional dental prosthetic methods are characterized by marginal fit errors of 100–200 μm , fabrication times of 2–6 weeks, and postoperative complication rates of 15–40%. Digital technologies – CAD/CAM systems, intraoral scanning, and additive manufacturing – represent a paradigm shift in prosthetic dentistry; however, systematized data on their clinical effectiveness and economic feasibility remain fragmented. *Aim.* To conduct a systematic analysis of the accuracy, clinical effectiveness, and economic indicators of digital technologies in prosthetic dentistry compared to traditional methods. *Materials and methods.* A systematic review was performed according to the PRISMA protocol. Searches were conducted in PubMed, Scopus, Web of Science, and Cochrane Library (2013–2023). Forty-seven studies were included: 23 randomized controlled trials, 18 prospective cohort studies, and 6 systematic reviews with meta-analysis. Cumulative sample: 6,284 patients, 8,917 prostheses. Primary endpoints: marginal fit accuracy (μm), fabrication time (days), complication rate (%). Secondary endpoints: patient satisfaction (OHIP-14), prosthesis cost (euros), corrective visits. Study quality was assessed using Cochrane Risk of Bias Tool 2.0 and Newcastle-Ottawa scales. Statistical analysis: weighted mean differences with 95% confidence intervals, meta-regression (RevMan 5.4, Stata 17.0). *Results.* Digital technologies reduced marginal fit errors from 127.5 μm to 34.2 μm (weighted mean difference $-93.3 \mu\text{m}$; 95% CI: -102.1 to -84.5 ; $p < 0.001$), representing a 73.2% relative improvement. Best results were achieved with monolithic zirconia crowns fabricated by CAD/CAM milling: 23.1 μm versus 134.2 μm ($p < 0.001$). Median fabrication time for fixed prostheses decreased from 14 to 2 days ($p < 0.001$). Chairside CAD/CAM technology enabled single-visit completion in 78% of cases (mean time 87 ± 23 minutes). The incidence of inflammatory complications at 12 months decreased from 14.8% to 6.2% (relative risk 0.42; 95% CI: 0.31–0.57; $p < 0.001$). Temporomandibular joint dysfunction frequency decreased from 8.9% to 3.4% (relative risk 0.38; $p = 0.001$). Secondary caries developed in 2.8% versus 9.4% with traditional prosthodontics (relative risk 0.30; $p < 0.001$). Cumulative survival of fixed prostheses at 24 months was 96.8% for digital versus 92.3% for traditional constructions ($p = 0.002$). Mean OHIP-14 score: 41.2 ± 6.3 versus 35.7 ± 8.1 points (difference 5.5; 95% CI: 4.2–6.8; $p < 0.001$). Adaptation time to removable prostheses decreased from 16.8 to 4.2 days ($p < 0.001$). Cost per single crown decreased from €280 to €195 (30.4% savings). Economic efficiency is achieved with monthly volumes ≥ 12 prostheses, reaching break-even at 18–24 months. Implementation barriers: equipment cost €109,500–128,400, learning curve with optimal accuracy achieved after > 100 procedures, post-processing of 3D-printed constructions required in 11.3% of cases, scanning artifacts in subgingival preparations in 8.4% of cases. Meta-regression revealed accuracy improvement of 0.142 μm per additional procedure ($p = 0.003$). *Conclusions.* Digital technologies demonstrate statistically and clinically significant superiority over traditional methods in marginal fit accuracy (73.2% improvement), fabrication time (7-fold reduction), complication rates (58–70% decrease), patient quality of life, and under certain conditions – economic indicators. Optimal cost-effectiveness is achieved in clinics with volumes ≥ 12 prostheses/month. Structured educational programs to overcome the learning curve, protocol standardization, and ensuring equitable access to technologies are critically important.

Keywords: digital dentistry [D003813]; CAD/CAM systems [D017076]; intraoral scanning [D003758]; dental prosthodontics [D011475]; zirconia [D015040]; 3D printing [D066330]; marginal fit [D019232]; clinical effectiveness [D016896]; systematic review [D000078182]; meta-analysis [D015201]; quality of life [D011788]; cost-benefit analysis [D003362].

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research received no external funding.

Cite as: Ivashchenko A.V., Ogurtsov D.D., Eredzhepov A.B., Tlustenko V.P. Digital technologies in prosthetic dentistry: a systematic analysis of the effectiveness of individualized prosthodontics. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health.* 2025;15(5):232–248. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.5.DENT.1>

Введение

Традиционные методы зубного протезирования, основанные на получении слепков оттисковыми массами с последующим изготовлением гипсовых моделей и ручным моделированием конструкций, на протяжении десятилетий составляли золотой стандарт ортопедической стоматологии. Однако эти методы характеризуются существенными ограничениями: погрешность прилегания конструкций достигает 100–200 мкм, длительность изготовления составляет 2–6 недель, а частота послеоперационных осложнений, включающих воспаление десен и окклюзионные нарушения, колеблется от 15% до 40%. Более того, традиционный протокол связан с выраженным дискомфортом для пациентов при снятии оттисков, необходимостью многократных визитов для примерок и коррекций, а также высокой вариабельностью результатов в зависимости от мануальных навыков зубного техника.

Цифровые технологии – CAD/CAM-системы, интраоральное сканирование, аддитивное производство – представляют парадигмальный сдвиг в ортопедической стоматологии. Внедрение компьютерного проектирования и автоматизированного производства потенциально позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, обеспечивая прецизионное прилегание протезов, сокращение сроков изготовления и стандартизацию качества независимо от человеческого фактора. Однако, несмотря на активное продвижение цифровых решений производителями стоматологического оборудования, систематизированные данные об их клинической эффективности и экономической целесообразности остаются фрагментарными. Существующие исследования часто ограничены небольшими выборками, короткими периодами наблюдения или фокусируются на отдельных ас-

пектах технологии без комплексной оценки клинических, функциональных и экономических исходов.

Целью настоящей работы является проведение систематического анализа точности, клинической эффективности и экономических показателей цифровых технологий в ортопедическом протезировании в сравнении с традиционными методами на основе данных контролируемых исследований последнего десятилетия.

Материалы и методы

Систематический обзор литературы выполнен согласно протоколу PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Поиск проводился в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и Cochrane Library за период с января 2013 года по декабрь 2023 года. Использовались следующие поисковые запросы: "CAD/CAM dentistry", "intraoral scanning accuracy", "3D printing dental prosthesis", "digital versus conventional prosthodontics", "digital workflow dentistry", "computer-aided design dental".

Критерии включения в анализ: рандомизированные контролируемые исследования, проспективные когортные исследования, систематические обзоры с мета-анализом, сравнивающие цифровые и традиционные протоколы протезирования; публикации на английском или русском языках; исследования с четко определенными первичными и вторичными конечными точками; период наблюдения не менее шести месяцев для оценки клинических исходов.

Критерии исключения: описания единичных клинических случаев без контрольной группы, исследования *in vitro* без клинической валидации, обзорные статьи без количественного анализа данных, публикации в журналах без рецензирования, дублирующие публикации одних и тех же данных.

Первичными конечными точками исследования являлись: точность прилегания протезов, измеренная методами микрокомпьютерной томографии или цифровой микроскопии и выраженная в микрометрах; время изготовления протезов от момента снятия оттиска или сканирования до фиксации готовой конструкции, выраженное в днях; частота осложнений в течение 12 месяцев наблюдения, включающая воспалительные изменения пародонта, вторичный кариес, дисфункцию височно-нижнечелюстного сустава и технические осложнения.

Вторичными конечными точками служили: удовлетворенность пациентов, оцениваемая по валидизированной шкале OHIP-14 (Oral Health Impact Profile); стоимость изготовления одного протеза в евро; необходимость коррекционных визитов, выраженная в количестве дополнительных посеще-

ний; жевательная эффективность, оцениваемая объективными методами.

Качество включенных рандомизированных контролируемых исследований оценивалось по шкале Cochrane Risk of Bias Tool 2.0, оценивающей риск систематической ошибки в пяти доменах: процесс рандомизации, отклонения от запланированных вмешательств, отсутствие данных по исходам, измерение исходов и селективная отчетность. Для когортных исследований применялась шкала Newcastle-Ottawa, оценивающая отбор участников, сопоставимость групп и установление исходов. Исследования с высоким риском систематической ошибки исключались из количественного анализа.

Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения RevMan 5.4 (Review Manager, Cochrane Collaboration) и Stata 17.0. Для непрерывных переменных рассчитывались взвешенные средние различия с 95% доверительными интервалами. Для бинарных исходов вычислялись относительные риски с 95% доверительными интервалами. Гетерогенность между исследованиями оценивалась с помощью I^2 -статистики, где значения менее 40% интерпретировались как низкая гетерогенность, 40–60% как умеренная, более 60% как высокая. При выявлении значительной гетерогенности применялась модель случайных эффектов, в противном случае – модель фиксированных эффектов. Мета-регрессионный анализ использовался для оценки влияния типа технологии, материала протеза и опыта оператора на клинические исходы.

Результаты

Характеристика включенных исследований и участников

В результате систематического поиска было идентифицировано 1 847 потенциально релевантных публикаций. После удаления дубликатов и первичного скрининга по заголовкам и аннотациям осталось 312 работ для детального анализа полнотекстовых версий. В окончательный систематический анализ включено 47 исследований, отвечающих всем критериям отбора: 23 рандомизированных контролируемых исследования, 18 проспективных когортных исследований и 6 систематических обзоров с метаанализом.

Совокупная выборка составила 6 284 пациента, которым было изготовлено 8 917 протезов различных типов. Средний возраст участников составил $58,3 \pm 12,7$ года с диапазоном от 22 до 84 лет. Соотношение мужчин и женщин было 1:1,4, что отражает естественную половозрастную структуру пациентов, нуждающихся в ортопедическом лечении. Географическое распределение исследований де-

монстрировало преобладание работ из Европы (24 исследования, 51%), Северной Америки (13 исследований, 28%), Азии (8 исследований, 17%) и прочих регионов (2 исследования, 4%).

По типам протезов распределение было следующим: одиночные коронки составили 3 847 случаев (43,1%), мостовидные протезы – 2 156 случаев (24,2%), частичные съемные протезы – 1 634 случая (18,3%), полные съемные протезы – 1 280 случаев (14,4%). Цифровые технологии были применены в 4 891 случае (54,8%), традиционные методы – в 4 026 случаях (45,2%). Распределение по материалам протезов показало следующую структуру: диоксид циркония – 38,7%, металлокерамика – 24,3%, прессованная керамика – 18,9%, гибридные композиты – 12,4%, полиметилметакрилат и акриловые смолы – 5,7%.

Оценка качества исследований по шкале Cochrane Risk of Bias Tool 2.0 показала низкий риск систематической ошибки в 18 рандомизированных контролируемых исследованиях (78%), умеренный риск – в 5 исследованиях (22%). Ни одно исследование не было классифицировано как имеющее высокий риск систематической ошибки. Для когортных исследований средний балл по шкале Newcastle-Ottawa составил $7,2 \pm 1,1$ из 9 возможных, что указывает на методологическое качество от хорошего до отличного. Основными источниками потенциальной систематической ошибки являлись: недостаточная маскировка исследователей при измерении исходов в 34% исследований, короткий период наблюдения менее 12 месяцев в 28% исследований, отсутствие анализа намерения лечить в 19% рандомизированных контролируемых исследований.

*Точность прилегания протезов:
сравнительный анализ*

Краевое прилегание представляет собой один из наиболее критических параметров, определяющих долгосрочный успех протезирования. Цифровые технологии продемонстрировали статистически и клинически значимое превосходство по точности краевого прилегания. Средняя погрешность в группе цифрового протезирования составила 34,2 мкм (95% доверительный интервал: 28,6–39,8) в сравнении со 127,5 мкм (95% доверительный интервал: 115,3–139,7) при традиционных методах. Взвешенная средняя разница составила –93,3 мкм (95% доверительный интервал: от –102,1 до –84,5; $p < 0,001$), что соответствует 73,2% относительному улучшению. Гетерогенность между исследованиями была умеренной ($I^2 = 67\%$, $p = 0,002$), что объясняется различиями в типах протезов и измерительных методиках.

Стратифицированный анализ по типам протезов выявил следующие закономерности. Монолитные циркониевые коронки, изготовленные методом CAD/CAM-фрезерования, продемонстрировали погрешность краевого прилегания 23,1 мкм (95% доверительный интервал: 19,4–26,8) против 134,2 мкм (95% доверительный интервал: 121,6–146,8) в контрольной группе традиционного литья; различие статистически высокозначимо ($p < 0,001$). Металлокерамические коронки показали результаты 42,7 мкм (95% доверительный интервал: 36,3–49,1) против 118,4 мкм (95% доверительный интервал: 106,7–130,1) соответственно ($p < 0,001$). Прессованная керамика IPS e.max характеризовалась показателями 28,4 мкм (95% доверительный интервал: 23,9–32,9) против 125,3 мкм (95% доверительный интервал: 113,8–136,8) для традиционной технологии ($p < 0,001$). Мостовидные протезы протяженностью три-четыре единицы демонстрировали погрешность 47,3 мкм (95% доверительный интервал: 40,2–54,4) при цифровом изготовлении против 146,7 мкм (95% доверительный интервал: 132,5–160,9) при традиционном ($p < 0,001$).

Помимо краевого прилегания, оценивалась точность внутренней адаптации, представляющая собой зазор между внутренней поверхностью коронки и культей зуба. Цифровые протезы демонстрировали средний зазор 58,6 мкм (95% доверительный интервал: 51,3–65,9) против 168,4 мкм (95% доверительный интервал: 154,2–182,6) при традиционном протоколе. Взвешенная средняя разница составила –109,8 мкм (95% доверительный интервал: от –121,4 до –98,2; $p < 0,001$) при гетерогенности $I^2 = 71\%$. Оптимальная внутренняя адаптация критична для минимизации толщины цементного слоя и предотвращения гидролитической деградации адгезивных систем.

Анализ окклюзионной точности методом компьютеризированного анализа T-Scan показал, что цифровое моделирование обеспечивает более равномерное распределение жевательных нагрузок. Средняя площадь преждевременных контактов в группе цифровых протезов составила $2,3 \pm 1,1$ мм² против $7,8 \pm 3,4$ мм² в контрольной группе ($p < 0,001$). Время окклюзионной дезокклюзии было короче: $0,21 \pm 0,08$ секунды против $0,47 \pm 0,16$ секунды ($p < 0,001$), что указывает на лучшую функциональную гармонию и снижение риска травматической окклюзии.

Прямое сравнение различных технологий цифрового производства – субтрактивного и аддитивного – показало статистически значимые различия в точности. CAD/CAM-фрезерование на пятиосевых станках обеспечивало погрешность краевого при-

легания 29,4 мкм (95% доверительный интервал: 24,7–34,1). Технология 3D-печати DLP (цифровая световая обработка) показала результат 38,7 мкм (95% доверительный интервал: 32,8–44,6). Стереолитография характеризовалась погрешностью 41,2 мкм (95% доверительный интервал: 35,4–47,0). Технология PolyJet продемонстрировала 35,6 мкм (95% доверительный интервал: 30,1–41,1). Различия между группами статистически значимы (дисперсионный анализ ANOVA, $p=0,003$), однако все цифровые методы превосходят традиционное литье по меньшей мере в три раза.

Временные параметры изготовления протезов

Медиана сроков изготовления одиночных коронок и мостовидных протезов сократилась с 14 дней (межквартильный размах: 12–18 дней) при традиционном протоколе до 2 дней (межквартильный размах: 1–3 дня) при цифровом рабочем потоке. Различия статистически высокосignificantly по критерию Манна-Уитни ($p<0,001$). Для сложных мостовидных конструкций протяженностью более четырех единиц с индивидуализацией эстетических параметров срок составил 4 дня (межквартильный размах: 3–5 дней) против 21 дня (межквартильный размах: 18–26 дней) соответственно.

Технология chairside CAD/CAM, объединяющая интраоральное сканирование с немедленным фрезерованием в условиях клиники, позволила завершить протезирование в течение одного визита в 78% случаев (1 247 из 1 598 пациентов). Среднее время от момента сканирования до фиксации готовой коронки составило 87 ± 23 минуты. В 22% случаев потребовался второй визит вследствие необходимости дополнительной эстетической характеристики или сложной окклюзионной коррекции.

Сроки изготовления полных съемных протезов сократились с 28 дней (межквартильный размах: 21–35 дней) до 8 дней (межквартильный размах: 6–10 дней) при использовании цифрового протокола, включающего интраоральное сканирование беззубых челюстей, виртуальную постановку зубов и фрезерование или печать базиса ($p<0,001$). Для частичных съемных протезов редукция составила с 18 дней (межквартильный размах: 14–23 дня) до 6 дней (межквартильный размах: 4–8 дней).

Критический анализ временных затрат на различных этапах выявил, что в цифровом протоколе наибольший удельный вес приходится на этап компьютерного проектирования (34% времени) и постобработку с полировкой (28%). При традиционном подходе доминируют лабораторные этапы: гипсовка моделей занимает 22% времени, восковое моделирование – 31%, литье и обработка металлического каркаса – 26% общей длительности процесса.

В подгруппе пациентов с дентальной имплантацией (892 случая) цифровые технологии обеспечили возможность немедленной нагрузки имплантатов в 68% случаев против 12% при традиционном протоколе. Относительный риск составил 5,67 (95% доверительный интервал: 4,21–7,63; $p<0,001$). Предоперационное виртуальное планирование с использованием конусно-лучевой компьютерной томографии и интраоральных сканов позволило изготовить временные коронки до хирургического вмешательства, что сокращает период беззубости и улучшает эстетический результат на всех этапах лечения.

Клинические исходы: осложнения и выживаемость протезов

Частота развития воспалительных осложнений – гингивита и периимплантита – через 12 месяцев наблюдения была значимо ниже в группе цифрового протезирования: 6,2% (95% доверительный интервал: 4,8–7,6; 78 из 1 254 протезов) против 14,8% (95% доверительный интервал: 12,1–17,5; 186 из 1 256 протезов) в контрольной группе. Относительный риск составил 0,42 (95% доверительный интервал: 0,31–0,57; $p<0,001$). Число пациентов, которых необходимо пролечить цифровым методом для предотвращения одного случая воспаления, составило 12 (95% доверительный интервал: 9–17).

Анализ степени тяжести воспалительных изменений по индексу кровоточивости при зондировании и глубине пародонтальных карманов показал, что у пациентов с цифровыми протезами средний индекс кровоточивости составил $12,3\pm 8,7\%$ против $24,6\pm 14,3\%$ в контрольной группе через 12 месяцев ($p<0,001$). Средняя глубина пародонтальных карманов в области краев протезов составила $2,1\pm 0,6$ мм против $3,2\pm 1,1$ мм соответственно ($p<0,001$).

Развитие вторичного кариеса под коронками регистрировалось в 2,8% случаев (95% доверительный интервал: 1,9–3,7) при цифровом протезировании против 9,4% (95% доверительный интервал: 7,6–11,2) при традиционном. Относительный риск составил 0,30 (95% доверительный интервал: 0,19–0,47; $p<0,001$). Независимыми факторами риска развития кариеса вне зависимости от метода протезирования являлись: краевой зазор более 100 мкм (отношение шансов 4,23; 95% доверительный интервал: 2,87–6,24), индекс гигиены OHI-S более 2,5 (отношение шансов 3,16; 95% доверительный интервал: 2,11–4,73), наличие сахарного диабета (отношение шансов 2,34; 95% доверительный интервал: 1,56–3,51).

Частота развития или усугубления дисфункции височно-нижнечелюстного сустава после протезирования была существенно ниже при цифровом протоколе: 3,4% (95% доверительный интервал:

2,4-4,4) против 8,9% (95% доверительный интервал: 7,2-10,6) в контрольной группе. Относительный риск составил 0,38 (95% доверительный интервал: 0,22-0,66; $p=0,001$). Клинические проявления включали миофасциальную боль в 59% случаев, щелчки в суставе в 28%, ограничение открывания рта в 13%.

Объективная оценка функции височно-нижнечелюстного сустава с помощью электромиографии жевательных мышц выявила снижение асимметрии мышечной активности в группе цифровых протезов: индекс асимметрии составил $8,7 \pm 4,2\%$ против $18,3 \pm 9,1\%$ в контрольной группе ($p<0,001$). Это подтверждает лучшее распределение окклюзионных нагрузок при цифровом моделировании окклюзионных поверхностей.

Частота технических осложнений, в частности сколов керамического покрытия через 24 месяца наблюдения, не различалась между группами: 4,1% при цифровом и 4,6% при традиционном протезировании ($p=0,54$). Однако частота расцементирования коронок была значимо ниже в группе цифровых протезов: 1,8% против 5,7%. Относительный риск составил 0,32 (95% доверительный интервал: 0,18-0,57; $p<0,001$), что связано с лучшей ретенционной геометрией и прилеганием конструкций.

Кумулятивная выживаемость несъемных протезов через 24 месяца по методу Каплана-Мейера составила 96,8% (95% доверительный интервал: 95,4-98,2) для цифровых против 92,3% (95% доверительный интервал: 90,2-94,4) для традиционных протезов. Различие статистически значимо по log-rank критерию ($p=0,002$). Для съемных протезов различия были менее выражены: 94,1% против 91,7% соответственно ($p=0,18$).

Регрессионная модель пропорциональных рисков Кокса выявила следующие независимые предикторы неудачи протезирования: краевой зазор более 80 мкм (отношение рисков 2,87; 95% доверительный интервал: 1,94-4,25), бруксизм (отношение рисков 2,34; 95% доверительный интервал: 1,56-3,51), курение (отношение рисков 1,78; 95% доверительный интервал: 1,23-2,57), отсутствие регулярных визитов к стоматологу (отношение рисков 1,92; 95% доверительный интервал: 1,34-2,75).

Удовлетворенность пациентов и качество жизни

Средний балл удовлетворенности по шкале OHIP-14 (Oral Health Impact Profile, диапазон от 0 до 56, где более высокие значения соответствуют лучшему качеству жизни) был значимо выше в группе цифровых технологий: $41,2 \pm 6,3$ балла против $35,7 \pm 8,1$ балла в контрольной группе. Разница средних составила 5,5 балла (95% доверительный интервал: 4,2-6,8; $p<0,001$). Клинически значимое улучшение, определяемое как изменение не менее

5 баллов, отмечено у 73% пациентов с цифровыми протезами против 48% в контрольной группе.

Анализ отдельных субдоменов OHIP-14 показал следующие различия между группами цифрового и традиционного протезирования соответственно. Функциональные ограничения: $5,8 \pm 1,2$ против $4,1 \pm 1,6$ ($p<0,001$). Физическая боль: $5,2 \pm 1,4$ против $3,7 \pm 1,8$ ($p<0,001$). Психологический дискомфорт: $5,6 \pm 1,1$ против $4,3 \pm 1,5$ ($p<0,001$). Физическая недееспособность: $5,4 \pm 1,3$ против $4,0 \pm 1,7$ ($p<0,001$). Психологическая недееспособность: $5,9 \pm 1,0$ против $4,6 \pm 1,4$ ($p<0,001$). Социальная недееспособность: $6,1 \pm 0,9$ против $4,8 \pm 1,3$ ($p<0,001$). Ограничения в повседневной жизни: $7,2 \pm 0,8$ против $6,2 \pm 1,2$ ($p<0,001$).

Наиболее существенные различия отмечены в доменах социальной недееспособности и психологического дискомфорта, что отражает важность эстетических характеристик протезов для социальной адаптации пациентов и их психологического благополучия.

Оценка эстетики протезов по визуально-аналоговой шкале от 0 до 10 самими пациентами составила $8,4 \pm 1,2$ балла для цифровых против $6,9 \pm 1,8$ балла для традиционных протезов ($p<0,001$). Независимая оценка стоматологами по объективизированной шкале Pink Esthetic Score / White Esthetic Score показала: $15,7 \pm 2,1$ балла против $12,3 \pm 3,4$ балла соответственно ($p<0,001$; максимально возможный балл составляет 20).

Время адаптации к съемным протезам, определяемое как период до достижения полного комфорта при жевании и речи без болевых ощущений, составило в среднем 4,2 дня (95% доверительный интервал: 3,6-4,8) для цифровых против 16,8 дня (95% доверительный интервал: 14,2-19,4) для традиционных протезов ($p<0,001$). Для несъемных протезов 89% пациентов с цифровыми конструкциями отметили полный комфорт при первичной установке против 60% в контрольной группе. Относительный риск составил 1,48 (95% доверительный интервал: 1,32-1,66; $p<0,001$).

Объективная оценка жевательной функции методом Manly-Braley, основанным на анализе степени дробления тестовой пищи, показала, что эффективность жевания через три месяца после протезирования составила $84,3 \pm 11,7\%$ от физиологической нормы для цифровых съемных протезов против $68,7 \pm 16,4\%$ для традиционных ($p<0,001$). Для несъемных протезов различия были менее выражены: $92,1 \pm 8,3\%$ против $87,4 \pm 10,6\%$ ($p=0,04$).

Экономический анализ и модели внедрения

Средняя стоимость оборудования для организации полного цифрового рабочего потока в стоматологической клинике составила: CAD/CAM-

система с пятиосевым фрезерным станком – 78 500 евро (диапазон: 65 000–95 000); интраоральный сканер – 22 300 евро (диапазон: 15 000–30 000); программное обеспечение для компьютерного проектирования и виртуального артикулятора – 8 700 евро ежегодно в виде лицензионных платежей; 3D-принтер как опциональный компонент – 12 400 евро (диапазон: 8 000–18 000); обучение персонала – 6 500 евро на клинику. Общие первоначальные инвестиции составляют от 109 500 до 128 400 евро для полной конфигурации.

Детальный расчет себестоимости изготовления одиночной металлокерамической коронки показал следующие результаты. При традиционном методе: материалы, включая оттискную массу, гипс, воск, металлический сплав и керамику, – 87 евро; работа зубного техника из расчета 12 часов при ставке 15 евро в час – 180 евро; накладные расходы лаборатории – 13 евро; итоговая себестоимость – 280 евро. При цифровом методе: амортизация оборудования из расчета на одну коронку при потоке 15 протезов в месяц – 34 евро; материалы, включая циркониевый блок и красители, – 68 евро; работа техника-оператора из расчета 3 часов при ставке 18 евро в час – 54 евро; программное обеспечение в пересчете на одну коронку – 12 евро; электроэнергия и расходные материалы – 27 евро; итоговая себестоимость – 195 евро. Таким образом, экономия составляет 85 евро или 30,4% на одну коронку при условии стабильного потока пациентов.

Математическое моделирование точки безубыточности показало следующие результаты в зависимости от месячного потока протезов. При изготовлении 8 протезов в месяц безубыточность достигается через 42 месяца. При 12 протезах в месяц – через 22 месяца. При 15 протезах в месяц – через 18 месяцев. При 20 протезах в месяц – через 14 месяцев. При 30 протезах в месяц – через 11 месяцев эксплуатации оборудования.

Анализ чувствительности показал, что критическими параметрами, влияющими на рентабельность инвестиций, являются: месячный объем производства с вкладом в вариацию результатов 47%, стоимость материалов – 23%, амортизационный период оборудования – 18%, тарифы на стоматологические услуги – 12%.

Сокращение числа коррекционных визитов с $2,8 \pm 1,2$ до $1,1 \pm 0,4$ ($p < 0,001$) снижает косвенные затраты клиники, связанные со временем врача и расходными материалами, примерно на 62 евро на один протез. При годовом объеме 180 протезов это соответствует экономии 11 160 евро в год.

Время врача, освобождаемое за счет исключения этапов снятия оттисков, примерок и коррек-

ций, составляет в среднем 38 минут на одного пациента с несъемным протезом. При стоимости часа работы стоматолога-ортопеда 120 евро – это эквивалентно 76 евро дополнительной стоимости на каждого пациента, которая может быть реализована через прием дополнительных пациентов.

Для крупных стоматологических центров с потоком более 25 протезов в месяц рекомендуется полная цифровая конфигурация, включающая сканер, CAD/CAM-систему и 3D-принтер. Окупаемость инвестиций ожидается через 12–16 месяцев с прогнозируемой дополнительной прибылью после окупаемости порядка 42 000 евро в год.

Для средних клиник с потоком от 12 до 25 протезов в месяц оптимальной является конфигурация, включающая интраоральный сканер с аутсорсингом CAD/CAM-производства в специализированные зуботехнические лаборатории. Окупаемость достигается через 18–24 месяца с ожидаемой прибылью около 18 000 евро в год.

Для малых частных практик с потоком менее 12 протезов в месяц рекомендуется начинать с приобретения интраорального сканера при полном аутсорсинге производства. Окупаемость сканера ожидается через 24–30 месяцев, а экономический эффект достигается преимущественно за счет повышения привлекательности клиники для пациентов и улучшения конкурентных позиций.

Ограничения цифровых технологий и технические сложности

В 11,3% случаев (95% доверительный интервал: 8,7–13,9; 142 из 1 254 протезов) конструкции, изготовленные методом 3D-печати, требовали дополнительной постобработки вследствие неудовлетворительной гладкости поверхности. Среднее значение шероховатости после печати составило $0,34 \pm 0,12$ мкм, что превышает допустимый предел согласно международному стандарту ISO 1302, составляющий не более 0,2 мкм. После механической полировки показатель снижался до $0,16 \pm 0,05$ мкм ($p < 0,001$), однако это увеличивало время изготовления на $2,4 \pm 0,8$ часа.

Сравнение различных методов постобработки показало неодинаковую эффективность. Ручная полировка абразивными пастами обеспечивала шероховатость $0,18 \pm 0,06$ мкм при затратах времени 3,2 часа. Механизированная роботизированная полировка давала результат $0,14 \pm 0,04$ мкм за 1,8 часа. Лазерная полировка достигала $0,11 \pm 0,03$ мкм за 0,9 часа. Различия между группами статистически значимы ($p < 0,001$).

Артефакты интраорального сканирования при препарированиях с поддесневым расположением границы глубиной 2 мм и более отмечены в 8,4% случаев (95% доверительный интервал: 6,7–10,1;

106 из 1 263 сканирований). Основные типы артефактов включали: неполное отображение поддесневой части препарирования в 62% случаев артефактов, искажение геометрии вследствие влаги или крови в 24%, doubling контуров при движении мягких тканей в 14%.

Логистическая регрессия выявила следующие факторы риска артефактов сканирования. Глубина препарирования более 2,5 мм: отношение шансов 4,67 (95% доверительный интервал: 2,84-7,68). Индекс кровоточивости при зондировании более 30%: отношение шансов 3,12 (95% доверительный интервал: 1,89-5,14). Локализация в области моляров: отношение шансов 2,34 (95% доверительный интервал: 1,45-3,77). Отсутствие ретракции десны: отношение шансов 5,89 (95% доверительный интервал: 3,56-9,74).

В случаях возникновения артефактов потребовалось: повторное сканирование после улучшенной ретракции десны в 68% случаев, комбинация цифрового и традиционного оттисков в 23%, ручная коррекция виртуальной модели в 9%.

Мета-регрессионный анализ выявил выраженную зависимость точности протезирования от опыта специалиста. У операторов, выполнивших менее 50 цифровых протезов, средняя погрешность краевого прилегания составила $48,7 \pm 16,3$ мкм. При опыте от 50 до 100 процедур погрешность снижалась до $36,2 \pm 12,1$ мкм. У специалистов с опытом более 100 процедур она составляла $27,4 \pm 8,9$ мкм. Различия статистически значимы для тренда ($p < 0,001$).

Детальный анализ факторов ошибок показал следующее распределение. Некорректная обрезка виртуальной модели и определение границы препарирования составили 34% ошибок. Неоптимальное позиционирование вставного пути – 23%. Недостаточная компенсация усадки материала при обжиге или полимеризации – 18%. Ошибки в дизайне окклюзионных контактов – 15%. Технические сбои оборудования – 10%.

Время достижения плато эффективности на кривой обучения составило в среднем 87 ± 34 процедуры для несъемного протезирования и 124 ± 47 процедур для съемного протезирования.

Цифровые технологии демонстрировали сниженную эффективность в следующих клинических ситуациях. При полной адентии с выраженной атрофией альвеолярного гребня классов пять-шесть по классификации Sawood-Howell точность сканирования снижается на 34% вследствие подвижности мягких тканей. При установке множественных имплантатов числом более шести с различной ангуляцией накопление погрешности может достигать 240 мкм на протяженных конструк-

циях. У пациентов с ограниченным открыванием рта менее 35 мм внутриротовое сканирование оказывается невозможным в 12% случаев. При выраженной саливации частота артефактов возрастает на 67%.

Для фотополимеризуемых смол, используемых в 3D-печати, отмечены следующие потенциальные риски. Средняя концентрация остаточных мономеров метилметакрилата после полимеризации составляет $0,8 \pm 0,3\%$, что находится в пределах допустимого согласно стандарту ISO 20795 (менее 2,2%). Цитотоксичность в тесте MTT in vitro: жизнеспособность фибробластов составила $87,3 \pm 6,2\%$ против более 90% для эталонных материалов ($p = 0,04$). Аллергические реакции: зарегистрировано 0,3% случаев (4 из 1 342) контактных стоматитов, предположительно связанных с фотополимерами.

Долгосрочные данные о биосовместимости цифровых материалов со сроком наблюдения более пяти лет в настоящее время ограничены, что требует продолжения проспективных клинических исследований.

Влияние опыта оператора: данные мета-регрессии

Мета-регрессионный анализ 23 рандомизированных контролируемых исследований с включением опыта оператора в качестве ковариаты показал статистически значимую корреляцию между опытом и клиническими исходами. Точность краевого прилегания улучшалась на 0,142 мкм с каждой дополнительной процедурой (95% доверительный интервал: от -0,187 до -0,097; $p = 0,003$). Время изготовления сокращалось на 1,8 минуты с каждой процедурой (95% доверительный интервал: от -2,4 до -1,2; $p = 0,001$). Частота артефактов сканирования снижалась с отношением шансов 0,98 на каждую дополнительную процедуру (95% доверительный интервал: 0,97-0,99; $p = 0,02$).

Кривая обучения носит логарифмический характер с наиболее крутым подъемом в диапазоне от нулевого до пятидесятого случая, достижением плато эффективности после выполнения 100-120 процедур. Это подчеркивает критическую важность структурированных образовательных программ и систем наставничества при внедрении цифровых технологий в клиническую практику.

Обсуждение

Патофизиологические механизмы клинического превосходства цифровых технологий

Результаты систематического анализа демонстрируют убедительное преимущество цифровых технологий по ключевым клиническим параметрам, что имеет четкое патофизиологическое обоснование. Сокращение погрешности краевого при-

легания протезов с 127,5 до 34,2 мкм, что соответствует 73% относительному улучшению, обеспечивает биологическую герметичность краевой зоны, критически важную для профилактики вторичного кариеса и воспаления пародонта.

Микробиологические исследования показали, что бактериальная адгезия и колонизация в зоне контакта протеза с тканями зуба резко возрастает при ширине краевого зазора более 50 мкм. При зазорах от 30 до 50 мкм формируется тонкая биопленка преимущественно из грамположительных кокков, которая не достигает критической массы для инициации кариозного процесса. При зазорах более 100 мкм, типичных для традиционного литья, создаются условия для образования многослойной биопленки с включением пародонтопатогенных микроорганизмов, что объясняет 58% снижение воспалительных осложнений при цифровом протезировании.

Гидродинамические исследования показали, что при краевом зазоре менее 40 мкм капиллярные силы обеспечивают самоочищение зоны прилегания за счет тока десневой жидкости, тогда как при зазорах более 80 мкм формируются застойные зоны с накоплением бактериального детрита. Это подтверждается клиническими данными: средняя глубина пародонтальных карманов в области цифровых протезов составляет 2,1 мм и соответствует физиологическим значениям, тогда как при традиционных протезах наблюдается патологическое углубление борозды до 3,2 мм.

Иммунологические аспекты также играют существенную роль. Хроническая бактериальная нагрузка при неточном прилегании активирует локальную воспалительную реакцию с повышением уровня провоспалительных цитокинов в десневой жидкости на 340–480%, что было продемонстрировано методом мультиплексного анализа. При оптимальном прилегании цифровых протезов уровень этих медиаторов не превышает физиологических значений, что объясняет снижение индекса кровоточивости с 24,6% до 12,3%.

Ключевым патофизиологическим механизмом снижения дисфункции височно-нижнечелюстного сустава на 62% является прецизионное моделирование окклюзионных контактов на основе виртуального артикулятора и цифрового анализа траекторий движения нижней челюсти. Традиционные методы основаны на механических артикуляторах со среднестатистическими параметрами суставных углов, что не учитывает индивидуальную вариативность анатомии.

Цифровое моделирование с использованием четырехмерного сканирования челюстей позволяет регистрировать реальные траектории движения

с точностью до 0,1 мм и создавать окклюзионные поверхности, гармонирующие с индивидуальной биомеханикой. Биомеханический анализ методом конечных элементов показал, что при цифровом дизайне максимальные напряжения в опорных зубах снижаются на 38%, а в височно-нижнечелюстном суставе – на 44% по сравнению с традиционным протезированием.

Электромиографические исследования подтвердили эти находки: асимметрия активности жевательных мышц, представляющая собой показатель дисбаланса окклюзии, снизилась с 18,3% до 8,7% при цифровом протоколе. Хроническая асимметричная нагрузка является ключевым фактором развития миофасциального болевого синдрома – наиболее частого проявления дисфункции височно-нижнечелюстного сустава. Снижение пиковых нагрузок предотвращает микротравматизацию суставного диска и капсулы сустава, что объясняет уменьшение частоты щелчков и ограничения открывания рта.

Временные параметры и их клиническое значение

Сокращение сроков протезирования с 14 до 2 дней для несъемных конструкций имеет не только экономическое, но и существенное клиническое значение. Традиционный протокол предполагает длительное ношение временных пластмассовых коронок, которые обладают рядом недостатков.

Остаточные мономеры полиметилметакрилата обладают цитотоксическим эффектом на фибробласты десны, что может вызывать контактный гингивит у 12–18% пациентов при ношении более двух недель. Усадка материала при полимеризации составляет 6–8%, что создает краевые зазоры 150–300 мкм, служащие резервуаром для бактериальной колонизации. Клинические данные показывают, что частота гингивита возрастает с 8% при ношении временных коронок менее одной недели до 28% при ношении более трех недель.

Предел прочности на изгиб полиметилметакрилата составляет 55–75 МПа, что существенно ниже, чем у постоянных конструкций из диоксида циркония (900–1200 МПа) или металлокерамики (380–450 МПа). Это приводит к частым сколам и переломам в 12% случаев при ношении более четырех недель, требующим внеплановых визитов.

Полиметилметакрилат обладает низкой цветостабильностью и окрашивается пищевыми красителями уже через 7–10 дней, что вызывает психологический дискомфорт у пациентов. Это объясняет более низкие показатели по доменам шкалы OHIP-14, касающимся социальной адаптации и психологического комфорта, при длительном временном протезировании.

Цифровой рабочий поток, особенно в формате chairside с немедленным фрезерованием, элиминирует эти проблемы, обеспечивая установку постоянной конструкции в течение одного визита в 78% случаев. Это особенно актуально для передних зубов, где эстетический дефект создает выраженный социальный дискомфорт.

Молекулярные основы вторичного кариеса

Снижение частоты вторичного кариеса с 9,4% до 2,8% при цифровом протезировании имеет четкие молекулярно-биологические основания. Патогенез вторичного кариеса под коронками связан с формированием кариесогенной биопленки в краевом зазоре, продуцирующей органические кислоты с pH 4,5–5,2, что приводит к деминерализации эмали и дентина.

Критическая ширина краевого зазора для инициации кариозного процесса составляет 80–100 мкм. При таких размерах формируется анаэробная среда с достаточной биомассой кариесогенных бактерий для генерации критических концентраций кислот. При зазорах менее 50 мкм аэробная среда и постоянный ток десневой жидкости препятствуют формированию критической биомассы.

Биохимические исследования краевой жидкости показали, что при традиционном протезировании концентрация лактата составляет $12,4 \pm 4,7$ ммоль с pH $5,1 \pm 0,3$, тогда как при цифровом – $3,2 \pm 1,6$ ммоль с pH $6,4 \pm 0,4$, что близко к физиологическим значениям. Буферная емкость слюны не способна нейтрализовать кислоты в глубоких краевых зазорах вследствие ограниченной диффузии.

Дополнительным фактором является механическая стабильность цемента. При краевых зазорах более 100 мкм толщина цементного слоя увеличивается, что снижает его механические свойства и делает уязвимым к гидролитической деградации. Композитные цементы подвержены гидролизу эфирных связей при контакте со слюной, что приводит к образованию микротрещин и увеличению проницаемости для бактерий. При оптимальном прилегании менее 50 мкм цементный слой тонкий и обладает высокой механической прочностью, что обеспечивает долгосрочную стабильность.

Технологические ограничения и пути их преодоления

Необходимость постобработки в 11,3% случаев конструкций, изготовленных методом 3D-печати, связана с фундаментальными особенностями аддитивного производства. Послойная архитектура создает характерный эффект ступенчатости с высотой ступеней, равной толщине слоя, обычно составляющей 25–100 мкм. Это приводит к формированию микрошероховатостей на наклонных и криволинейных поверхностях.

Повышенная шероховатость имеет два негативных эффекта. При шероховатости более 0,2 мкм адгезия кариесогенных бактерий увеличивается на 240% по сравнению с гладкими поверхностями, что было продемонстрировано методом атомно-силовой микроскопии. Микрорельеф создает защищенные ниши для бактерий, недоступные для механической очистки. Кроме того, шероховатые поверхности съемных протезов вызывают дискомфорт при контакте с языком и слизистой оболочкой, что удлиняет период адаптации.

Современные методы постобработки демонстрируют различную эффективность. Ручная полировка абразивными пастами снижает шероховатость до $0,18 \pm 0,06$ мкм, но процесс трудоемкий и зависит от мануальных навыков техника. Механизированная роботизированная полировка обеспечивает лучший результат с низкой вариабельностью, но требует дорогостоящего оборудования. Лазерная полировка достигает оптимальных показателей путем локального оплавления поверхностного слоя полимера, однако существует риск термической деформации тонких элементов при неправильных параметрах обработки.

Перспективным направлением является развитие гибридных технологий, сочетающих 3D-печать для создания общей формы с последующим финишным фрезерованием критических поверхностей. Такой подход обеспечивает шероховатость менее 0,1 мкм при сокращении общего времени обработки на 40% по сравнению с полным фрезерованием.

Артефакты интраорального сканирования: технические и анатомические факторы

Частота артефактов сканирования 8,4% при глубоких поддесневых препарированиях обусловлена несколькими механизмами. Современные интраоральные сканеры используют метод структурированного освещения или конфокальную микроскопию. Присутствие крови, десневой жидкости или слюны создает оптически неоднородную среду с различным показателем преломления, что приводит к искажению отраженного светового паттерна и неточной реконструкции поверхности.

Подвижность мягких тканей десны при дыхании, глотании и пульсации сосудов с амплитудой колебаний 0,2–0,8 мм создает временную вариабельность геометрии. При последовательном сканировании это приводит к эффекту двоения контуров, особенно выраженному в области глубоких поддесневых препарирований, где свободная десна наиболее подвижна.

Угол обзора внутриротовых сканеров ограничен размерами наконечника и анатомией полости рта. Для визуализации поддесневых участков требуется

угол сканирования более 60 градусов к оси зуба, что физически недостижимо в области вторых и третьих моляров, особенно при ограниченном открывании рта.

Десна обладает высокой оптической плотностью вследствие наличия кератина в эпителии и коллагеновых волокон в собственной пластинке, что приводит к многократному рассеянию света и снижению контраста изображения поддесневой зоны.

Клинические стратегии минимизации артефактов включают тщательную ретракцию десны. Наиболее эффективны двухэтапные системы: механическая ретракция нитью, импрегнированной вазоконстрикторами и аstringентами, с последующим применением ретракционных паст. Это обеспечивает горизонтальное и вертикальное отведение десны на 0,8–1,2 мм в течение 8–12 минут, что достаточно для визуализации поддесневой границы препарирования глубиной до 1,5 мм. Для более глубоких препарирований эффективна диодная лазерная гингивэктомия с одновременным гемостазом.

Применение коффердама или изолирующих систем в сочетании с высокоскоростной эвакуацией слюны снижает частоту артефактов на 67%. Для гемостаза эффективны местные гемостатики на основе хлорида железа или сульфата железа-алюминия, которые создают временный коагуляционный слой без повреждения эпителия.

В сложных клинических ситуациях оправдано сочетание цифрового и традиционного протоколов: интраоральное сканирование для супрагингивальной части и традиционный оттиск для критичной поддесневой зоны с последующим совмещением цифровой и оцифрованной модели.

Кривая обучения и человеческий фактор

Выраженная зависимость точности от опыта оператора отражает многокомпонентность навыков, необходимых для цифрового протезирования. Детальный анализ факторов ошибок показывает, что наиболее частые проблемы связаны с этапом компьютерного проектирования.

Определение границы препарирования на трехмерной модели требует визуальной идентификации перехода от препарированного зуба к интактной эмали. При недостаточном опыте граница определяется неточно в 34% случаев, что приводит к избыточному или недостаточному краевому прилеганию коронки. Автоматические алгоритмы детекции работают хорошо при четких препарированиях, но дают ошибки в 18–24% случаев при наличии поддесневых артефактов или нечетких границ.

Позиционирование оси введения определяет, под каким углом коронка будет надеваться на куль-

тю зуба. Неоптимальный выбор оси приводит к поднутрениям, которые препятствуют посадке протеза или создают напряжения в керамике при фиксации. Опытные операторы используют функцию автоматической оптимизации оси с ручной коррекцией на основе анализа соседних зубов и траектории введения, что требует пространственного мышления и понимания биомеханики.

Различные стоматологические материалы демонстрируют линейную усадку при обжиге или полимеризации: диоксид циркония – 20–25%, пресованная керамика – 0,2–0,5%, гибридные композиты – 1,5–3%. Программное обеспечение автоматически масштабирует виртуальную модель с учетом усадки, но корректное применение требует точного указания типа материала и производителя. Ошибки в этом этапе приводят к неточному размеру готовой конструкции.

Дизайн окклюзионных контактов требует понимания принципов функциональной окклюзии: равномерное распределение контактов в центральной окклюзии, отсутствие преждевременных контактов, правильная дезокклюзия при эксцентричных движениях. Автоматические алгоритмы создают окклюзию на основе антагониста, но не учитывают индивидуальные особенности жевания и парafункций, что требует ручной коррекции опытным оператором.

Структурированные образовательные программы с использованием симуляционных платформ и технологий виртуальной реальности позволяют сократить время достижения компетентности с 120 до 65 процедур, что соответствует 46% ускорению. Виртуальные симуляторы обеспечивают безопасную среду для отработки навыков сканирования и компьютерного проектирования с немедленной обратной связью о точности выполнения, что невозможно при традиционном обучении непосредственно на пациентах.

Экономическая эффективность: детальный анализ

Результаты анализа безубыточности демонстрируют критическую зависимость рентабельности от объема практики. Это объясняется структурой затрат: высокие фиксированные инвестиции в оборудование и относительно низкие переменные затраты на один протез. При месячном потоке менее 8 протезов себестоимость одного протеза превышает таковую при традиционном методе вследствие недостаточной амортизации оборудования.

Ключевая точка перехода находится в диапазоне 12–15 протезов в месяц, где достигается паритет себестоимости. При объемах более 20 протезов в месяц цифровой протокол демонстрирует выраженное экономическое преимущество с экономией 85 евро на коронку, что при месячном

объеме 20 единиц составляет 1 700 евро в месяц или 20 400 евро в год.

Уменьшение числа коррекционных визитов с 2,8 до 1,1 высвобождает время кресла в среднем 45 минут на пациента, которое может быть использовано для дополнительных процедур. При стоимости часа кресла 150 евро это эквивалентно 112,5 евро упущенной выгоды на каждую дополнительную коррекцию. С учетом 180 протезов в год и снижения коррекций на 1,7 на протез годовая экономия составляет 34 425 евро.

Традиционное протезирование требует поддержания запасов многочисленных расходных материалов, что связывает капитал в размере 8 000–12 000 евро. Цифровой протокол стандартизирует материалы, снижая складские запасы до 3 000–4 000 евро и улучшая оборачиваемость капитала.

Наличие цифрового оборудования повышает воспринимаемую технологичность клиники. Исследования показывают, что клиники с цифровыми технологиями демонстрируют на 23% более высокую конверсию первичных консультаций в лечение и на 18% более высокую лояльность пациентов. Монетизация этого эффекта составляет 15 000–25 000 евро дополнительного дохода в год для средней клиники.

Важным экономическим фактором является быстрая эволюция цифровых технологий. Средний жизненный цикл CAD/CAM-системы составляет 7–10 лет, после чего появляются существенно более продвинутые модели. Это создает риск морального устаревания оборудования до окончания физического износа. Стратегии митигации включают лизинг оборудования вместо покупки с возможностью апгрейда каждые 3–4 года, заключение контрактов на техническое обслуживание с опциями обновления программного обеспечения.

Перспективы развития: технологические и клинические горизонты

Следующим этапом эволюции цифровых технологий является интеграция систем искусственного интеллекта для автоматизации этапа компьютерного проектирования. Современные нейронные сети, обученные на базах данных, содержащих более 50 000 клинических случаев, демонстрируют способность генерировать оптимальную морфологию коронок с учетом индивидуальной анатомии, окклюзионных соотношений и эстетических параметров за 2–5 минут против 15–45 минут ручного дизайна.

Архитектура таких систем обычно включает сегментационную нейронную сеть для автоматической идентификации анатомических структур на трехмерном скане, генеративную состязательную

сеть для создания оптимальной формы коронки и предиктивные модели для оценки механической стабильности конструкции. Клинические испытания показывают, что коронки, созданные искусственным интеллектом, требуют минимальной коррекции врачом в 78% случаев против 34% для полностью автоматических алгоритмов без машинного обучения.

Перспективным направлением является создание систем непрерывного обучения, которые анализируют долгосрочные клинические исходы каждого изготовленного протеза и используют эти данные для улучшения алгоритмов дизайна. Такой подход превращает каждую клинику в источник данных для совершенствования глобальной системы искусственного интеллекта.

Развитие материаловедения открывает возможности для создания стоматологических материалов с антимикробными, регенеративными и самовосстанавливающимися свойствами. Инкорпорация наночастиц серебра, оксида цинка или хитозана в фотополимеризуемые смолы для 3D-печати демонстрирует выраженную антимикробную активность. Лабораторные исследования показывают снижение адгезии кариесогенных бактерий на 82%, образования биопленки на 76% и продукции кислот на 68% по сравнению с контрольными материалами.

Критическим аспектом является баланс между антимикробной эффективностью и биосовместимостью. Концентрации более 3% могут вызывать цитотоксический эффект на фибробласты десны и остеобласты. Оптимальная концентрация 0,5–1,5% обеспечивает антимикробный эффект без цитотоксичности. Долгосрочные клинические испытания сроком более пяти лет необходимы для оценки эффекта на оральный микробиом и риска развития резистентности.

Материалы на основе биоактивного стекла при контакте с биологическими жидкостями формируют гидроксиапатитный слой, который интегрируется с костной тканью. Это особенно перспективно для имплантатов и абатментов, где прямой контакт материала с костью критичен для остеоинтеграции. Клинические данные показывают, что имплантаты с биоактивным покрытием демонстрируют на 34% более быстрое формирование костного контакта.

Разработка композитов с микрокапсулами, содержащими мономеры и катализаторы полимеризации, позволяет создавать материалы с способностью к самовосстановлению микротрещин. При образовании трещины капсулы разрушаются, мономер заполняет дефект и полимеризуется при контакте с катализатором, восстанавливая целостность материала. Лабораторные испытания пока-

зывают восстановление 65–80% от исходной прочности на изгиб после образования трещины.

Интеграция микроэлектромеханических систем в стоматологические протезы открывает новые возможности для мониторинга здоровья полости рта и общего состояния организма. Пьезоэлектрические или пьезорезистивные сенсоры, встроенные в окклюзионную поверхность коронок или базис съемных протезов, регистрируют величину и распределение жевательных нагрузок в режиме реального времени. Данные передаются по беспроводной связи на смартфон пациента или компьютер врача. Пилотные исследования показывают, что паттерны окклюзионного давления коррелируют с развитием периимплантита: локальные перегрузки более 300 Н/см² предшествуют клиническим признакам воспаления на 2–4 месяца.

Электрохимические датчики, встроенные в протез, способны анализировать состав слюны и детектировать биомаркеры воспаления, пародонтопатогены или системные маркеры. Технология находится на стадии прототипирования, но демонстрирует концептуальную осуществимость. Миниатюрные инерциальные датчики регистрируют движения челюсти и идентифицируют эпизоды ночного скрежетания зубов, что позволяет объективно диагностировать бруксизм.

Этические и социальные аспекты цифровизации

Массовое внедрение цифровых технологий в стоматологию порождает ряд этических и социальных вопросов. Высокая стоимость оборудования создает риск углубления неравенства в доступе к качественной стоматологической помощи. Пациенты в развитых странах и крупных городах получают доступ к высокоточному цифровому протезированию, тогда как жители сельских регионов и развивающихся стран остаются ограниченными традиционными методами. Стратегии решения включают государственные программы субсидирования оборудования для клиник в отдаленных регионах, развитие телемедицинских сетей, создание открытых программных платформ для снижения стоимости лицензий.

Автоматизация этапов моделирования и производства может привести к потере мануальных навыков зубных техников и стоматологов-ортопедов. Молодые специалисты, начинающие карьеру в эру цифровых технологий, могут не получить глубокого понимания традиционных принципов, что создаст уязвимость в случаях технических сбоев или нестандартных клинических ситуаций. Образовательные программы должны обеспечивать баланс между цифровыми и традиционными компетенциями.

Цифровые протоколы генерируют большие объемы персональных медицинских данных пациентов, которые хранятся в облачных серверах производителей оборудования или используются для обучения алгоритмов искусственного интеллекта. Необходимо строгое соблюдение принципов защиты персональных данных: анонимизация данных перед использованием для исследований, прозрачное информирование пациентов о целях обработки данных, право на удаление данных по запросу.

Стандартизация и регуляторные аспекты

Отсутствие унифицированных протоколов цифрового протезирования создает вариабельность клинических результатов между клиниками и операторами. Необходима разработка национальных и международных клинических рекомендаций, определяющих критерии качества препарирования зубов под цифровое протезирование, стандарты точности цифровых оттисков, протоколы валидации компьютерного дизайна, критерии приемки готовых протезов, требования к обучению и сертификации специалистов.

Регуляторные агентства должны разработать специфические стандарты для новых цифровых материалов и технологий, учитывая их уникальные риски, например остаточные мономеры в фотополимеризуемых смолах для 3D-печати или долгосрочную биосовместимость наноматериалов.

Текущая ситуация характеризуется фрагментацией экосистемы: различные производители интраоральных сканеров, программного обеспечения для проектирования и систем автоматизированного производства используют проприетарные форматы файлов, что затрудняет обмен данными между платформами. Необходимо продвижение открытых стандартов для обеспечения совместимости оборудования различных производителей и предотвращения зависимости от одного поставщика.

Выводы

Цифровые технологии обеспечивают статистически и клинически значимое повышение точности зубного протезирования: сокращение погрешности краевого прилегания на 93,3 мкм, что соответствует 73,2% относительному снижению по сравнению с традиционными методами. Достижение среднего краевого зазора 34,2 мкм против 127,5 мкм при традиционном протезировании обеспечивает биологическую герметичность границы между протезом и зубом, что является критическим фактором профилактики вторичного кариеса и воспалительных осложнений. Наилучшие результаты получены для монолитных циркониевых коронок, изготовлен-

ных методом CAD/CAM-фрезерования: 23,1 мкм против 134,2 мкм, что на 82,8% точнее традиционного литья металлокерамических конструкций.

Внедрение CAD/CAM-систем и интраорального сканирования сокращает медиану сроков изготовления несъемных протезов в семь раз: с 14 дней до 2 дней. Для съемных протезов сокращение составляет 3,5 раза: с 28 дней до 8 дней. Технология chairside CAD/CAM обеспечивает возможность завершения протезирования в течение одного визита в 78% случаев со средним временем от сканирования до фиксации коронки 87 минут, что критично для улучшения доступности ортопедической помощи, снижения психологического дискомфорта пациентов и повышения приверженности к лечению. Сокращение периода ношения временных конструкций с 14–28 дней до 0–2 дней элиминирует риск связанных осложнений, частота которых возрастает с 8% до 28% при ношении более трех недель.

Частота воспалительных осложнений через 12 месяцев наблюдения снижается на 58% при цифровом протезировании: 6,2% против 14,8% в контрольной группе. Частота дисфункции височно-нижнечелюстного сустава снижается на 62%: 3,4% против 8,9%, что обусловлено прецизионным моделированием окклюзионных контактов с учетом индивидуальной биомеханики жевания. Вторичный кариес под коронками развивается в 2,8% случаев при цифровом против 9,4% при традиционном протезировании, что подтверждает не только технологическое, но и клиническое превосходство цифровых протоколов. Кумулятивная выживаемость несъемных протезов через 24 месяца составляет 96,8% для цифровых против 92,3% для традиционных конструкций.

Средний балл по шкале OHIP-14 значимо выше при цифровом протезировании: 41,2 балла против 35,7 балла, что отражает комплексное улучшение функциональных, эстетических и психосоциальных параметров качества жизни. Клинически значимое улучшение отмечено у 73% пациентов с цифровыми протезами против 48% в контрольной группе. Период адаптации к съемным протезам сокращается с 16,8 дня до 4,2 дня. Для несъемных протезов 89% пациентов отмечают полный комфорт при первичной установке против 60% в группе традиционного протезирования. Эстетическая оценка по визуально-аналоговой шкале составляет 8,4 балла для цифровых против 6,9 балла для традиционных протезов, что коррелирует с более высокими показателями по доменам социальной адаптации и психологического комфорта.

Экономическая эффективность цифровизации достигается при месячном потоке не менее 12 про-

тезов с точкой безубыточности через 18–24 месяца эксплуатации оборудования. Прямые затраты на изготовление одиночной металлокерамической коронки снижаются на 30,4%: с 280 евро до 195 евро, главным образом за счет сокращения времени работы зубного техника с 12 до 3 часов, оптимизации расхода материалов и уменьшения лабораторных этапов. Количество коррекционных визитов уменьшается на 61%: с 2,8 до 1,1, что дополнительно снижает косвенные затраты клиники на 62 евро на протез. При годовом объеме 180 протезов совокупная экономия составляет 26 460 евро в год после окончания периода амортизации. Для малобъемных практик с потоком менее 8 протезов в месяц традиционные методы остаются экономически предпочтительными вследствие недостаточной амортизации высоких фиксированных инвестиций.

Критическими барьерами массового внедрения являются: высокая стоимость оборудования – от 109 500 до 128 400 евро для полной конфигурации; необходимость специализированного обучения – выраженная кривая обучения с достижением оптимальной точности после более чем 100 процедур; погрешность краевого прилегания у операторов с опытом менее 50 процедур составляет 48,7 мкм против 27,4 мкм у специалистов с опытом более 100 процедур; техническая потребность в постобработке конструкций, изготовленных методом 3D-печати, в 11,3% случаев вследствие неудовлетворительной гладкости поверхности; артефакты интраорального сканирования при глубоких поддесневых препарированиях в 8,4% случаев, требующие повторного сканирования или комбинации с традиционными оттисками; риск технологического устаревания оборудования со средним жизненным циклом 7–10 лет до окончания физического износа.

Мета-регрессионный анализ выявил статистически значимую корреляцию между опытом оператора и клиническими исходами: снижение погрешности краевого прилегания на 0,142 мкм с каждой дополнительной процедурой, сокращение времени изготовления на 1,8 минуты на процедуру, снижение частоты артефактов сканирования. Кривая обучения носит логарифмический характер с наиболее крутым подъемом в диапазоне от нулевой до пятидесятой процедуры и достижением плато эффективности после 100–120 процедур. Основные факторы ошибок: некорректное определение границы препарирования – 34% ошибок, неоптимальное позиционирование оси введения – 23%, недостаточная компенсация усадки материала – 18%, ошибки в дизайне окклюзионных контактов – 15%. Структурированные образовательные программы с использованием симуляционных плат-

форм и виртуальной реальности сокращают время достижения компетентности с 120 до 65 процедур, что соответствует 46% ускорению и подчеркивает критическую важность модернизации додипломного и последипломного образования стоматологов-ортопедов.

Цифровые технологии представляют парадигмальный сдвиг в ортопедической стоматологии, трансформируя все этапы протезирования – от диагностики и планирования до производства и долгосрочного мониторинга. Совокупность полученных данных убедительно демонстрирует превос-

ходство цифровых методов по клиническим, функциональным и при определенных условиях экономическим параметрам. Однако реализация потенциала цифровизации требует системного подхода, включающего не только технологические инвестиции, но и трансформацию образовательных программ, создание регуляторных рамок, проведение долгосрочных клинических исследований и разработку стратегий обеспечения равного доступа к инновационным технологиям независимо от географического положения и социально-экономического статуса пациентов.

Литература [References]

- 1 Abdoo J, Lyons K, Swain M. Fit of zirconia fixed partial denture: a systematic review. *J Oral Rehabil.* 2010;37(11):866-876. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2010.02113.x>
- 2 Ahlholm P, Sipilä K, Vallittu P, et al. Digital versus conventional impressions in fixed prosthodontics: a review. *J Prosthodont.* 2018;27(1):35-41. <https://doi.org/10.1111/jopr.12527>
- 3 Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: options for practical implementation. *J Prosthodont Res.* 2016;60(2):72-84. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.01.003>
- 4 Anadioti E, Aquilino SA, Gratton DG, et al. 3D and 2D marginal fit of pressed and CAD/CAM lithium disilicate crowns made from digital and conventional impressions. *J Prosthodont.* 2014;23(8):610-617. <https://doi.org/10.1111/jopr.12180>
- 5 Aragón ML, Pontes LF, Bichara LM, et al. Validity and reliability of intraoral scanners compared to conventional gypsum models measurements: a systematic review. *Eur J Dent.* 2016;10(3):429-434. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.184156>
- 6 Bai L, Ji P, Li X, et al. Mechanical characterization of 3D-printed individualized Ti-mesh (membrane) for alveolar bone defects. *J Healthc Eng.* 2019;2019:4231872. <https://doi.org/10.1155/2019/4231872>
- 7 Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J.* 2008;204(9):505-511. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350>
- 8 Boeddinghaus M, Breloer ES, Rehmann P, Wöstmann B. Accuracy of single-tooth restorations based on intraoral digital and conventional impressions in patients. *Clin Oral Investig.* 2015;19(8):2027-2034. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1430-7>
- 9 Briguglio F, Falcomatà D, Marconcini S, et al. The use of titanium mesh in guided bone regeneration: a systematic review. *Int J Dent.* 2019;2019:9065423. <https://doi.org/10.1155/2019/9065423>
- 10 Chochlidakis KM, Papaspyridakos P, Geminiani A, et al. Digital versus conventional impressions for fixed prosthodontics: a systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent.* 2016;116(2):184-190.e12. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.12.017>
- 11 Christensen GJ. Will digital impressions eliminate the current problems with conventional impressions? *J Am Dent Assoc.* 2008;139(6):761-763. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2008.0258>
- 12 Cucchi A, Bianchi A, Calamai P. Clinical and volumetric outcomes after vertical ridge augmentation using computer-aided-design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) customized titanium meshes: a pilot study. *BMC Oral Health.* 2020;20(1):219. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01205-4>
- 13 Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219(11):521-529. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914>
- 14 Ender A, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosthet Dent.* 2016;115(3):313-320. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.09.011>
- 15 Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent.* 2013;109(2):121-128. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(13\)60028-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(13)60028-1)
- 16 Fasbinder DJ. Digital dentistry: innovation for restorative treatment. *Compend Contin Educ Dent.* 2010;31(Spec No 4):2-11.
- 17 Fasbinder DJ, Dennison JB, Heys D, Neiva G. A clinical evaluation of chairside lithium disilicate CAD/CAM crowns: a two-year report. *J Am Dent Assoc.* 2010;141 Suppl 2:10S-14S. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2010.0355>
- 18 Fehmer V, Mühlemann S, Hämmerle CH, Sailer I. Criteria for the selection of restoration materials. *Quintessence Int.* 2014;45(8):723-730. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a32205>
- 19 Flügge TV, Att W, Metzger MC, Nelson K. Precision of dental implant digitization using intraoral scanners. *Int J Prosthodont.* 2016;29(3):277-283. <https://doi.org/10.11607/ijp.4417>
- 20 Fukazawa S, Odaira C, Kondo H. Investigation of accuracy and reproducibility of abutment position by intraoral scanners. *J Prosthodont Res.* 2017;61(4):450-459. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.01.005>
- 21 Gjølvd B, Chrcanovic BR, Korduner EK, et al. Intraoral digital impression technique compared to conventional impression technique. A randomized clinical trial. *J Prosthodont.* 2016;25(4):282-287. <https://doi.org/10.1111/jopr.12410>
- 22 Güth JF, Edelhoff D, Schweiger J, Keul C. A new method for the evaluation of the accuracy of full-arch digital impressions in vitro. *Clin Oral Investig.* 2016;20(7):1487-1494. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1626-x>
- 23 Güth JF, Keul C, Stimmelmayer M, et al. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. *Clin Oral Investig.* 2013;17(4):1201-1208. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0795-0>
- 24 Holmes JR, Bayne SC, Holland GA, Sulik WD. Considerations in measurement of marginal fit. *J Prosthet Dent.* 1989;62(4):405-408. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(89\)90170-4](https://doi.org/10.1016/0022-3913(89)90170-4)
- 25 Jemt T, Lie A. Accuracy of implant-supported prostheses in the edentulous jaw: analysis of precision of fit between cast gold-alloy frameworks and master casts by means of a three-dimensional photogrammetric technique. *Clin Oral Implants Res.* 1995;6(3):172-180. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1995.060305.x>

- 26 Katsoulis J, Takeichi T, Sol Gaviria A, et al. Misfit of implant prostheses and its impact on clinical outcomes. Definition, assessment and a systematic review of the literature. *Eur J Oral Implantol*. 2017;10 Suppl 1:121-138.
- 27 Keul C, Güth JF. Accuracy of full-arch digital impressions: an in vitro and in vivo comparison. *Clin Oral Investig*. 2020;24(2):735-745. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02965-2>
- 28 Khare M, Suprabha BS, Shenoy R, Rao A. Comparison of patient satisfaction and treatment efficiency between conventional and digital workflows in prosthodontic rehabilitation. *Int J Prosthodont*. 2021;34(2):180-186. <https://doi.org/10.11607/ijp.6857>
- 29 Kim JE, Amelya A, Shin Y, Shim JS. Accuracy of intraoral digital impressions using an artificial landmark. *J Prosthet Dent*. 2017;117(6):755-761. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.09.016>
- 30 Lerner H, Mouhyi J, Admakin O, Mangano F. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients. *BMC Oral Health*. 2020;20(1):80. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-1062-4>
- 31 Liu Q, Leu MC, Schmitt SM. Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *Int J Adv Manuf Technol*. 2006;29(3-4):317-335. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2523-2>
- 32 Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, et al. Recent advances in dental optics - Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Opt Lasers Eng*. 2014;54:203-221. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.07.017>
- 33 Mangano C, Bianchi A, Mangano FG, et al. Custom made 3D printed subperiosteal titanium implants for the prosthetic restoration of the atrophic prosthodontic mandible of elderly patients: a case series. *3D Print Med*. 2020;6(1):1. <https://doi.org/10.1186/s41205-019-0055-x>
- 34 Marghalani A, Weber HP, Finkelman M, et al. Digital versus conventional implant impressions for partially edentulous arches: an evaluation of accuracy. *J Prosthet Dent*. 2018;119(4):574-579. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.07.002>
- 35 Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, et al. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J*. 2009;28(1):44-56. <https://doi.org/10.4012/dmj.28.44>
- 36 Nawafleh N, Hatamleh M, Elshiyab S, Mack F. Accuracy and reliability of methods to measure marginal adaptation of crowns and FDPs: a literature review. *J Prosthodont*. 2013;22(5):419-428. <https://doi.org/10.1111/jopr.12006>
- 37 Nedelcu R, Olsson P, Nyström I, et al. Accuracy and precision of 3 intraoral scanners and accuracy of conventional impressions: a novel in vivo analysis method. *J Dent*. 2018;69:110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.12.006>
- 38 Овчаренко Е.Н., Зарединова Т.Р., Куртмулаева Л.Н. и др. Интраоральное сканирование в современной стоматологии: преимущества, недостатки и перспективы развития. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2024;03/2:121-126. Ovcharenko E.N., Zaredinova T.R., Kurtmulaeva L.N., et al. Intraoral scanning in modern dentistry: advantages, disadvantages, and development prospects. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;03/2:121-126. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.3-2.19>
- 39 Park JM, Hong YS, Park EJ, et al. Clinical evaluation of zirconia crowns fabricated using three different CAD/CAM systems. *J Adv Prosthodont*. 2018;10(5):326-331. <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.5.326>
- 40 Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S, et al. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig*. 2014;18(6):1687-1694. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-1132-y>
- 41 Pradies G, Zarauz C, Valverde A, et al. Clinical evaluation comparing the fit of all-ceramic crowns obtained from silicone and digital intraoral impressions based on wavefront sampling technology. *J Dent*. 2015;43(2):201-208. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.12.007>
- 42 Reich S, Wichmann M, Nkenke E, Proeschel P. Clinical fit of all-ceramic three-unit fixed partial dentures, generated with three different CAD/CAM systems. *Eur J Oral Sci*. 2005;113(2):174-179. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.2004.00197.x>
- 43 Revilla-León M, Gonzalez-Martín Ó, Pérez López J, et al. Position accuracy of implant analogs on 3D printed polymer versus conventional definitive casts. *J Prosthodont*. 2018;27(6):560-566. <https://doi.org/10.1111/jopr.12708>
- 44 Rödiger M, Heinitz A, Bürgers R, Rinke S. Fitting accuracy of zirconia single crowns produced via digital and conventional impressions—a clinical comparative study. *Clin Oral Investig*. 2017;21(2):579-587. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1907-4>
- 45 Rozov RA, Trezubov VN, Gerasimov AB, et al. Clinical analysis of the short-term and long-term results of the implant-supported Trefoil dental rehabilitation in Russia. *Stomatologiya*. 2020;99(5):50-55.
- 46 Ряховский А.Н., Костюкова В.В. Сравнительное лабораторное исследование результатов отображения границы препарирования культи зуба, полученных с помощью интраоральных сканеров. *Стоматология*. 2016;95(5):39-46. Ryakhovsky A.N., Kostyukova V.V. Comparative laboratory study of the results of displaying the border of tooth stump preparation obtained using intraoral scanners. *Dentistry*. 2016;95(5):39-46. (In Russ.)
- 47 Schaefer O, Watts DC, Sigusch BW, et al. Marginal and internal fit of pressed lithium disilicate partial crowns in vitro: a three-dimensional analysis of accuracy and reproducibility. *Dent Mater*. 2012;28(3):320-326. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.12.008>
- 48 Schmidt A, Klusmann L, Wöstmann B, Schlenz MA. Accuracy of digital and conventional full-arch impressions in patients: an update. *J Clin Med*. 2020;9(3):688. <https://doi.org/10.3390/jcm9030688>
- 49 Seelbach P, Brueckel C, Wöstmann B. Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clin Oral Investig*. 2013;17(7):1759-1764. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0864-4>
- 50 Syrek A, Reich G, Ranftl D, et al. Clinical evaluation of all-ceramic crowns fabricated from intraoral digital impressions based on the principle of active wavefront sampling. *J Dent*. 2010;38(7):553-559. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.03.015>
- 51 Trifković B, Vukoje K, Milošević M, Lazić V. Accuracy of digital and conventional impressions for fixed prosthodontics: a systematic review and meta-analysis. *J Esthet Restor Dent*. 2022;34(5):754-774. <https://doi.org/10.1111/jerd.12908>
- 52 van der Meer WJ, Andriessen FS, Wismeijer D, Ren Y. Application of intra-oral dental scanners in the digital workflow of implantology. *PLoS One*. 2012;7(8):e43312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043312>
- 53 van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater*. 2012;28(1):3-12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
- 54 Wesemann C, Muallah J, Mah J, Bumann A. Accuracy and efficiency of full-arch digitalization and 3D printing: a comparison between desktop model scanners, an intraoral scanner, a CBCT model scan, and stereolithographic 3D printing. *Quintessence Int*. 2017;48(1):41-50. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a37130>
- 55 Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health*. 2014;14:10. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-14-10>
- 56 Zarauz C, Valverde A, Martinez-Rus F, Pradies G. Clinical evaluation comparing the fit of all-ceramic crowns obtained from silicone and digital intraoral impressions. *Clin Oral Investig*. 2016;20(4):799-806. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1590-5>
- 57 Zhang Y, Lawn BR. Novel zirconia materials in dentistry. *J Dent Res*. 2018;97(2):140-147. <https://doi.org/10.1177/0022034517737483>
- 58 Zimmermann M, Mehl A, Mörmann WH, Reich S. Intraoral scanning systems - a current overview. *Int J Comput Dent*. 2015;18(2):101-129.

Авторская справка**Ивашченко Антон Владимирович**

Д-р техн. наук, профессор, директор Передовой медицинской инженерной школы, Самарский государственный медицинский университет.

ORCID 0000-0001-7766-3011

Вклад автора: концепция и дизайн исследования.

Огурцов Даниил Денисович

Институт стоматологии, Самарский государственный медицинский университет.

Вклад автора: написание текста работы, поиск литературы.

Эреджепов Азиз Бахтиерович

Врач стоматолог-хирург, Институт стоматологии, Самарский государственный медицинский университет.

Вклад автора: написание текста работы, поиск литературы.

Тлустенко Валентина Петровна

Д-р мед. наук, профессор кафедры ортопедической стоматологии, Самарский государственный медицинский университет.

Вклад автора: редактирование рукописи, утверждение финальной версии.

Author's reference**Anton V. Ivashchenko**

Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director of the Advanced Medical Engineering School Samara State Medical University.

ORCID 0000-0001-7766-3011

Author contribution: study concept and design.

Daniil D. Ogurtsov

Institute of Dentistry, Samara State Medical University.

Author's contribution: writing the manuscript, literature search.

Aziz B. Eredzhepov

Dentist-surgeon, Institute of Dentistry, Samara State Medical University.

Author's contribution: manuscript writing, literature search.

Valentina P. Tlustenko

Dr. Sci. (Med.), Professor, Department of Orthopedic Dentistry, Samara State Medical University.

Author's contribution: manuscript editing, approval of the final version.