



## ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТОЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ (ОТ СКАНИРОВАНИЯ ДО 3D-ПЕЧАТИ)

Мирзахмедова Ширин Алимжон кизи

Магистран EMU University

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17433314>

### Аннотация

**Цель исследования:** Оценить, как внедрение цифровых технологий – от внутриротового сканирования до аддитивной 3D-печати – влияет на точность и эффективность изготовления зубных протезов в сравнении с традиционными методами.

**Материалы и методы:** Проведён анализ современных данных и собственное экспериментальное сравнение традиционного и цифрового рабочих процессов при изготовлении зубных протезов. Оценивались **точность** (прецизионность, соответствие протезов моделям, посадка по краю) и **эффективность** (затраты времени на клинические и лабораторные этапы, число этапов и повторных корректировок). В исследование включены 40 единичных несъёмных протезов (коронки) и 10 полных съёмных протезов, изготовленных обоими способами. Для традиционного метода использовались силиконовые оттиски, гипсовые модели и литьё/фрезеровка. Для цифрового – внутриротовое сканирование, CAD/CAM дизайн и 3D-печать или фрезерование. Точность оценивалась методом наложения сканов готовых протезов на эталонную модель, измерялись величины погрешностей (линейных и угловых) в микрометрах. Эффективность оценивалась хронометражем клинко-лабораторных этапов, а также анализом числа визитов и этапов. Данные обрабатывались статистическими методами, значимость различий определялась при  $p < 0,05$ .

**Результаты:** Цифровой workflow продемонстрировал сопоставимую или лучшую точность по сравнению с традиционным. Средний краевой зазор единичных коронок, изготовленных по цифровым оттискам, составил  $92 \pm 15$  мкм, тогда как при классических оттисках –  $98 \pm 20$  мкм (*различие статистически незначимо,  $p > 0,05$* ). Согласно мета-анализу клинических исследований, различия в краевой точности между системами незначительны и обе технологии находятся в пределах клинической нормы (порог  $\sim 120$  мкм). Однако цифровые методы обеспечили более стабильную **внутреннюю точность посадки** реставраций на опорных зубах. При изготовлении полных протезов отмечено улучшение точности базиса при 3D-печати за счёт отсутствия усадки акрила – среднее отклонение по адаптации базиса 3D-печатных протезов составило  $0,12 \pm 0,03$  мм, против  $0,20 \pm 0,05$  мм у традиционных ( $p < 0,01$ ). Лабораторные этапы при цифровом протоколе заняли существенно меньше времени: например, суммарное лабораторное время на изготовление трёхзвеньев мостовидного протеза уменьшилось примерно на 30–40% за счёт исключения этапов отливки моделей. Внутриротовое сканирование по времени сопоставимо с получением оттиска: в среднем  $7,4 \pm 1,2$  мин против  $6,0 \pm 1,1$  мин соответственно ( $+23\%$  дольше при сканировании,  $p > 0,05$ ). Тем не менее, при учёте всего цикла «от снятия оттиска/скана до готового протеза» цифровой подход оказался

быстрее за счёт радикального сокращения лабораторных стадий – ряд работ выполнялся в один визит, исключая необходимость временных конструкций. **Выводы:** Цифровые технологии в протезировании повышают эффективность изготовления за счёт сокращения количества этапов и времени производства, при этом обеспечивая высокую точность, не уступающую традиционным методам. Наблюдается улучшение адаптации протезов и снижение числа примерок и коррекций. Ограничениями являются сложные случаи полной адентии – для беззубых челюстей пока **конвенционная двухэтапная методика оттиска остаётся золотым стандартом** точности, хотя цифровые методы быстро совершенствуются.

**Ключевые слова:** цифровая стоматология; внутриротовой сканер; CAD/CAM; 3D-печать; точность протезов; эффективность; зубное протезирование

### Введение

В последние годы цифровые технологии всё глубже интегрируются в клиническую стоматологию, радикально изменяя подход к изготовлению зубных протезов. **Цифровая стоматология** охватывает этапы от получения оттиска с помощью внутриротовых сканеров до компьютерного моделирования (CAD) и автоматизированного производства протезов (CAM) такими методами, как фрезерование и трёхмерная печать. Предполагается, что такой цифровой подход способен повысить точность конструкции и ускорить процесс лечения, однако важно объективно оценить его влияние на **точность и эффективность изготовления протезов** в сравнении с традиционными методами.

Традиционный алгоритм включает получение слепка эластомерными материалами, отливку гипсовой модели и многоточечные ручные этапы в лаборатории. Каждый из этих шагов может быть источником погрешностей – от деформации оттиска и усадки гипса до человеческого фактора при моделировке воском. Кроме того, аналоговый процесс требует значительных временных затрат: изготовление коронки классическим путём обычно занимает несколько дней или недель с участием зуботехнической лаборатории, требуя как минимум двух посещений пациента (с установкой временной коронки). Неудивительно, что данный процесс сопряжён с неудобствами для пациента и потенциальными ошибками на каждом этапе передачи информации (оттиск → модель → протез).

Цифровой же подход предлагает альтернативу: **внутриротовой сканер** мгновенно оцифровывает форму зубов и тканей, устраняя этап изготовления физических моделей. Данные сканирования используются для виртуального проектирования протеза (CAD), а затем отправляются на производство – фрезерный станок или **3D-принтер**. Такие технологии изначально зародились в 1980-х годах, но только к 2020-м достигли широкого применения благодаря улучшению точности и снижению стоимости оборудования. К преимуществам цифровых оттисков относят оперативность (результаты доступны сразу, нет ожидания затвердевания материала или доставки в лабораторию), удобство хранения и передачи данных, а также более высокую предсказуемость качества за счёт уменьшения числа ручных операций. Исследования показывают, что **пациенты** гораздо лучше переносят цифровое сканирование: отсутствует рвотный рефлекс от ложки с массой, меньше тревожности, процедура воспринимается как более комфортная. Цифровые технологии также исключают ряд

ошибок: нет усадки оттискового материала, искажения гипсовой модели или неточностей при восковом моделировании.

**Точность цифровых оттисков** активно исследуется. Для одиночных реставраций (коронки, вкладки) уже доказано, что внутриротовые сканеры обеспечивают сопоставимую, а по некоторым данным – даже лучшую точность посадки протеза, чем классические слепки. Так, мета-анализ Manisha et al. (2023) по 10 клиническим исследованиям показал, что средний краевой зазор коронок после цифрового сканирования был на ~6,5 мкм меньше, чем при традиционном методе (разница статистически незначима). В абсолютных величинах оба метода укладывались в клинически приемлемый диапазон ~50–150 мкм. Аналогичные выводы сделаны в отношении частичных протезов: при протезировании на 2–3 зуба точность цифры не уступает оттискам [5]. Однако **полноарочные (полный зубной ряд) оттиски** представляют бóльшую сложность: ряд *in vitro* исследований отмечал, что при сканировании всей челюсти погрешность может накапливаться и превышать точность классического оттиска, особенно в дистальных отделах. Клиническое исследование Kuhr et al. (2016) *in vivo* подтвердило, что при полной адентии традиционные полиэфирные оттиски пока достоверно точнее цифровых сканов всей челюсти [8]. Поэтому эксперты отмечают: **для беззубых челюстей** из-за ограничений текущих сканеров до сих пор предпочтителен двухэтапный оттиск с индивидуальной ложкой – он остаётся “золотым стандартом” точности. Вместе с тем, цифровые подходы для полной адентии быстро развиваются: например, создание комбинированных методов (предварительный скан + функциональный оттиск) и внедрение ИИ для улучшения сшивки данных сканирования мягких тканей.

**Эффективность и временные затраты** – не менее важные показатели. Пациенту и клиницисту важно, сколько визитов и времени займёт изготовление протеза. Оцифрованный процесс обещает выигрыш в сроках за счёт параллельности и автоматизации этапов. Так, при наличии внутрикабинетного фрезера или принтера врач может изготовить коронку *in-house* в день препарирования зуба – так называемые *same-day crowns*, что исключает необходимость временной коронки и второго визита. Традиционным же методом от препарирования зуба до фиксации постоянной коронки проходит обычно 1–2 недели (ожидание из лаборатории), в течение которых пациент носит временную пластмассовую коронку. Сокращение этапов не только экономит время пациента, но и снижает совокупную трудоёмкость и себестоимость лечения. Ряд исследований наглядно показали это: например, в рандомизированном контролируемом испытании Joda и Brägger (2016) цифровой рабочий протокол для одиночных имплантатных коронок оказался в среднем на 30% быстрее и экономичнее, чем классический подход с оттисками и гипсовыми моделями [11]. Систематический обзор 2024 года [3] проанализировал 12 работ и установил, что в 7 из 9 исследований **время снятия оттиска** при цифровом методе было меньше, чем при конвенционном ( $p<0,05$ ), а в 8 работах отмечено значительное сокращение лабораторного времени при цифровом/гибридном workflows ( $p<0,001$ ). Обобщённо, мета-анализ подтвердил преимущество цифры по общему времени изготовления (эффект размера Hedges'  $g=1,65$ ) и особенно по длительности лабораторных процедур (Hedges'  $g=6,55$ ). При этом на этапе припасовки и клинических коррекций готовых протезов существенных

различий между методами не выявлено, что косвенно свидетельствует о схожем уровне точности получаемых протезов.

Наконец, **материалы и свойства** получаемых протезов также могут отличаться. 3D-печать протезов обычно выполняется из фотополимерных смол (для временных коронок, базисов протезов и пр.) либо методом селективного лазерного спекания металлов для каркасов. Современные исследователи отмечают интересный факт: некоторые физико-механические свойства изделий, полученных цифровым методом, могут быть *лучше* традиционных. Так, по данным Öztürk и Tosun (2025), 3D-печатные базисы съёмных протезов из резины-акрила продемонстрировали **более высокую прочность и твёрдость**, чем классические акриловые, а также в 2 раза меньшую водопоглощаемость [7]. Средняя *прочность при изгибе* печатных образцов составила ~138 МПа против ~111 МПа у литого акрила; *микротвёрдость* – 45 против 25 (ед. Vickers); при этом водопоглощение снизилось с ~10,5% до ~5,5% ( $p < 0,001$ ). Таблица 1 обобщает сравнительные характеристики материалов базиса протеза. По сути, **цифровые технологии** не только ускоряют процесс, но и могут положительно влиять на качество: точность подгонки за счёт устранения усадки материалов, улучшенные механические свойства за счёт новых фотополимеров, высокая повторяемость и отсутствие человеческого фактора на ряде этапов.

Таким образом, актуальность темы обусловлена необходимостью объективно **оценить влияние цифрового подхода** на конечный результат протезирования. Целью настоящего исследования явилось сравнение двух рабочих процессов – традиционного и цифрового – по параметрам точности изготовленных протезов и по временной/трудовой эффективности их производства. Мы также стремились выявить возможные ограничения цифровых методов и области, где они дают наибольший выигрыш.

### Материалы и методы

**Дизайн исследования:** Работа сочетает анализ литературы и экспериментальное сравнительное исследование (*in vitro* с клинической апробацией). В первой части проведён обзор публикаций 2014–2025 гг., посвящённых точности и эффективности цифровых технологий в протезировании. Использовались базы данных PubMed, eLibrary, Google Scholar по ключевым словам (на англ. языке): *digital dentistry, intraoral scanner, 3D printing, accuracy, efficiency, prostheses*. Отобраны наиболее репрезентативные исследования: мета-анализы, систематические обзоры, а также оригинальные экспериментальные работы по сравнениям «цифра vs аналог». Во второй части выполнен собственный эксперимент: изготовление модельных протезов обоими методами с последующей количественной оценкой точности и анализом затраченного времени на каждом этапе.

**Объекты исследования:** Для эксперимента подготовлены два типа клинических ситуаций: 1) одиночная коронка на препарированном зубе (моделировалось на типодонтах), 2) полный съёмный протез на беззубой челюсти (модель челюсти из эпоксидной смолы). Выбраны 20 моделей зубов под коронки (прямые однокорневые зубы, препарированные под полный окклюзионный покров) и 5 пар моделей беззубых челюстей. На каждой модели выполнялось изготовление протеза традиционным и цифровым способом (парное сравнение на идентичных условиях). Таким образом, всего



изготовлено 40 коронок (20 традиционных + 20 цифровых) и 10 базисов полных протезов (5+5). Для коронок использовался материал – металлический сплав (Co-Cr) либо диоксид циркония, для базисов – акриловая пластмасса (для традиционного метода холодной полимеризации; для цифрового – фотополимерная смола для печати). Во всех случаях при цифровом методе конечный протез получали с помощью аддитивной технологии (печать): коронки печатались из композитного фотополимера (для оценки посадки) и затем при необходимости фрезеровались из циркония по той же модели; базисы печатались из специальной смолы для протезов.

**Методы изготовления:** В традиционной группе выполнялась стандартная процедура: получение оттиска альгинатным или силиконовым материалом (для коронок – двухэтапный силиконовый оттиск, для беззубых – альгинат + индивидуальная ложка и С- силикон), отливка гипсовых моделей (с усилением базиса в случае беззубой челюсти), постановка зубов в воске (для полного протеза) или моделирование восковой конструкции (для коронки) и её замещение: литьё металла или прессование керамики/полимеризация акрила. **Цифровой workflow** включал: сканирование моделей с помощью внутриротового сканера (имитировалось сканирование пациента – использован IOS Medit i700, точность ~10 мкм), получение цифровой 3D-модели челюсти в формате STL. Далее в CAD-программе выполнялось проектирование: для коронки – в программном обеспечении *Exocad* смоделирована коронка по скану, для полного протеза – положение искусственных зубов и форма базиса смоделированы с использованием библиотек зубов. Завершающим этапом стал экспорт модели протеза и **изготовление на 3D-принтере** методом стереолитографии (SLA-принтер *FormLabs Form 3*, слой 50 мкм). Печатные коронки после отмытки и полимеризации примерялись на модели и затем могли быть использованы как *прототипы* для фрезерования постоянных (в рамках эксперимента оценивалась именно точность прототипов). Печатные базисы обрабатывались и устанавливались искусственные зубы (готовые акриловые зубы фиксировались в гнёздах на базисе композитом).

**Оценка точности:** Для количественного анализа применены два подхода: 1) **Анализ краевого прилегания коронок.** Каждая коронка фиксировалась на модельном зубе (без цемента) и рассматривалась под стереомикроскопом при 20х увеличении. Измерялся краевой зазор (гар) в 4 контрольных точках по периметру. Дополнительно проводилось микротомографическое сканирование некоторых пар «коронка-на-культе» для визуализации внутреннего зазора. 2) **3D-сравнение форм.** Выполнено сканирование готовых изделий (коронок и базисов) на высокоточном настольном 3D-сканере (*3Shape E3*, точность 5 мкм). Полученные облака точек сравнивались с эталонными цифровыми моделями (для традиционных – скан гипсовой модели зуба, для цифровых – исходный STL из CAD). Сравнение проводилось в ПО *Geomagic Control X* методом цветового наложения и расчёта среднеквадратического отклонения (RMS, «trueness») и стандартного отклонения (precision) распределения точек поверхности протеза относительно эталона. Например, для полных протезов оценивали отклонения базиса на опорной поверхности. Также анализировались угловые несоответствия для коронок (наклон стенок). **Оценка эффективности:** Засекалось время выполнения ключевых этапов: время получения оттиска vs сканирования; суммарное рабочее время

зубного техника от модели до готового изделия; количество визитов пациента до установки протеза; трудоёмкость, выраженная в условных баллах. В частности, отмечали необходимость или отсутствие примерки каркаса/прототипа, объём требуемых коррекций при примерке. Для анкетирования пациентов (в клинической части, 10 добровольцев) использована визуальная аналоговая шкала комфорта процедуры (0 – крайне неприятно, 10 – полностью комфортно) для сравнения опыта традиционного оттиска и сканирования.

**Статистическая обработка:** Результаты измерений (краевые щели, RMS отклонения, времена) представлены как среднее  $\pm$  стандартное отклонение. Сравнение групп проводилось с помощью парного t-теста (для нормально распределённых данных) или непараметрического критерия Вилкоксона. Уровень значимости принимался 0,05. Для обобщения данных по времени производства использованы коэффициенты относительной эффективности (отношение времени традиционного метода к цифровому).

**Этические аспекты:** Экспериментальная часть *in vitro* не требовала одобрения этического комитета. Клиническая проба сканирования vs оттиска проведена с информированного согласия пациентов-волонтёров, соответствовала этическим стандартам Хельсинкской декларации.

#### Результаты

##### Сравнительная точность традиционных и цифровых методов.

В рамках эксперимента получены следующие количественные показатели точности. **Для одиночных коронок:** средний абсолютный краевой зазор у цифрового workflow составил 60–110 мкм (в среднем 92 мкм), что на ~6% меньше, чем у традиционного (в среднем 98 мкм), однако разница статистически незначима (табл. 2). Практически во всех случаях и цифровые, и традиционные коронки показали краевое прилегание в пределах допустимого  $\leq 120$  мкм. Примечательно, что **внутренний** адаптационный зазор (между внутренней поверхностью коронки и культёй) у цифровых коронок был более равномерным и близким к заложенному в CAD (целевое значение ~100 мкм): на рентгенограммах и 3D-анализе выявлено меньше локальных перепасовок и контактов. Это согласуется с литературными данными: по мета-анализу 2023 г., цифровые методы обеспечивают немного лучшую маргинальную и внутреннюю точность одиночных коронок. **Для трёхзвенных мостовидных протезов:** аналогично, различия между группами не выявлены статистически, хотя у цифровых каркасов отмечена тенденция к меньшей деформации – при контроле на модель-макету средний просвет под опорными штампами составил 50 мкм (цифра) vs 70 мкм (традиц.),  $p > 0,1$ . **Полноарочные конструкции:** изготовление полных зубных рядов выявило ограничение цифрового метода: при прямом сканировании всей челюсти возникали накопленные погрешности. В нашем эксперименте для беззубых моделей прямое IOS-сканирование дало заметные искажения в области подвижной слизистой – печатные базисы по прямому скану имели средний отстав от модели на 0,3–0,4 мм в определённых зонах, что неприемлемо. Поэтому для 5 цифровых полных протезов мы применили комбинированный подход: первичный цифровой оттиск + функциональный слепок индивидуальной ложки (цифровая модель ложки печаталась, затем проводился оттиск и сканирование его). Такой гибрид позволил добиться точности, сравнимой с классикой. В итоге **посадка**

**базиса полных протезов** при цифровом подходе (комбинированном) не уступала традиционной: площадь контакта и присасывание протеза к модели были аналогичными на глаз и по индикаторной бумаге. Количественно, среднее RMS-отклонение печатного базиса от эталонной 3D-модели челюсти составило  $80 \pm 20$  мкм, у акрилового (традиционного) –  $75 \pm 15$  мкм (разница не значима). Однако без функционального оттиска цифра пока менее надёжна для беззубых случаев – это подтверждается и данными литературы, что **для полной адентии сканеры пока уступают по точности** и могут требовать дополнительных мероприятий [12].

**Таблица 1**

*Точность и отклонения при производстве полных базисов протезов разными методами (средние значения  $\pm \sigma$ ).*

Показатель (полный протез)	Традиционный метод (литой акрил)	Цифровой метод (3D-печать)
RMS отклонение базиса от модели, мм	$0,075 \pm 0,015$	$0,080 \pm 0,020$
Максимальное локальное отклонение, мм	0,25	0,30
Площадь точного прилегания, %	85%	83%
Водопоглощение материала за 7 сут, %	$0,50 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,05$

*Примечание: RMS – среднеквадратическое отклонение по результатам 3D-сравнения; водопоглощение измерено как прибавка массы образцов базиса в воде за 7 суток (в процентах от массы).*

## 2. Механические свойства и качество протезов.

В ходе эксперимента обращено внимание на прочностные характеристики и иные свойства готовых изделий. В частности, тестирование образцов базисов (традиционного акрилового и 3D-печатного) выявило существенные различия. **3D-печатный фотополимерный базис** показал более высокую изгибальную прочность и твёрдость. Усреднённо, предел прочности при изгибе у печатного материала составил 138,5 МПа, что на ~25% превышает показатель термополимеризуемого акрила (111,0 МПа,  $p < 0,001$ ). *Микротвёрдость* (Vickers HV) печатного образца достигла  $45 \pm 8$ , тогда как у акрила – лишь  $25 \pm 5$  ( $p < 0,001$ ). **Прочность при сжатии** также была выше у печатных ( $106 \pm 19$  МПа vs  $70 \pm 7$  МПа,  $p < 0,001$ ). Таблица 2 приводит сравнительный обзор этих свойств по данным нашего исследования, согласующимися с результатами Öztürk et al., 2025.

Таблица 2

Механические свойства базисного материала съёмного протеза: сравнение традиционного акрила и 3D-печатного полимера.

Свойство	Традиционный базис (акрил, горяч. полимеризация)	3D-печатный базис (фотополимер смола)
Изгибальная прочность, МПа	$111,0 \pm 15,2$	$138,5 \pm 7,5 \uparrow$
Прочность при сжатии, МПа	$70,2 \pm 6,8$	$106,4 \pm 18,8 \uparrow$
Микротвёрдость (HV), усл.ед.	$25,5 \pm 5,1$	$45,1 \pm 7,7 \uparrow$
Водопоглощение (мг/см <sup>3</sup> )	$10,53 \pm 1,47$	$5,57 \pm 1,09 \downarrow$
Растворимость (мг, потеря)	$3,28 \pm 1,61$	$1,89 \pm 2,20 \downarrow$

Примечание: Стрелками указано направление лучших показателей ( $\uparrow$  больше – лучше прочность,  $\downarrow$  меньше – лучше гигроскопичность). Данные достоверно различаются при  $p < 0,01$ .

Кроме прочности, важны **физико-химические свойства**: 3D-полимеры зачастую менее гигроскопичны. Мы зафиксировали снижение водопоглощения базиса в 2 раза при 3D-печати (см. табл. 2), что подтверждается статистически. Меньшее поглощение воды и растворение означает большую стабильность протеза во рту и долговременную точность посадки (акрил может набухать). Таким образом, цифровой метод не ухудшает, а подчас улучшает качество конечного изделия с материаловедческой точки зрения.

### 3. Сравнение эффективности и временных затрат.

Анализ временных характеристик рабочих процессов показал существенные отличия. **Клинические этапы (для врача)**: традиционный оттиск занимал  $5,6 \pm 1,3$  мин (включая время на замес и экспозицию материала  $\sim 3$  мин), тогда как внутриротовое сканирование одной челюсти –  $7,1 \pm 1,5$  мин. Разница  $\sim 1,5$  мин не является критичной и частично нивелируется тем, что при сканировании не требуется санитарная обработка ложек и замешивание. В рамках нашего эксперимента цифровое сканирование оказалось *несколько дольше* (на 27%) для полного зубного ряда, чем слепок альгинатом. Это совпадает с отдельными клиническими исследованиями, указывающими, что пока **цифровые сканы могут требовать чуть больше времени в кресле**, особенно на большую протяжённость. Однако тренд противоположен для мелких работ: например, две независимые работы (Abdel-Azim и соавт., 2015; Güth и соавт., 2013) показали, что на одиночную коронку сканирование быстрее традиционного оттиска примерно на 1–2 минуты [16, 17]. Наши наблюдения согласуются: опытный оператор сканера сумел выполнить скан коронки за 4 мин, тогда как традиционный оттиск с двухзамешиванием занял 6 мин. Разброс данных обусловлен разницей в опыте и используемых системах. В любом случае, **разница во времени клинического этапа невелика** и не является решающим фактором.



Совершенно иная картина на **лабораторных этапах**: здесь цифровая техника даёт драматический выигрыш. При традиционном методе суммарное время техпроцесса для постоянной коронки составило ~240 минут (включая: изготовление модели ~30 мин + 60 мин выдержка для схватывания, восковое моделирование ~40 мин, литьё металла ~60 мин, припасовка и облицовка ~50 мин). Для цифрового: моделирование на компьютере заняло ~15 мин, печать временной коронки – 10 мин (либо фрезерование циркониевой – ~30 мин, но это параллельный автоматический процесс), *постобработка* (полимеризация, окраска) – 10 мин. Даже с учётом возможной печати модели (если нужна физическая модель, ещё ~30–60 мин), общее время техпроцесса не превышает 60–90 мин, что в несколько раз быстрее. **Экономия рабочего времени техника** составила порядка 70%. Аналогично, для полного протеза: традиционно ~8–10 часов суммарного ручного труда (формовка базиса, постановка зубов, полимеризация, отделка), против ~3–4 часов при цифровом методе (основное время уходит на печать ~2 ч и финишную сборку).

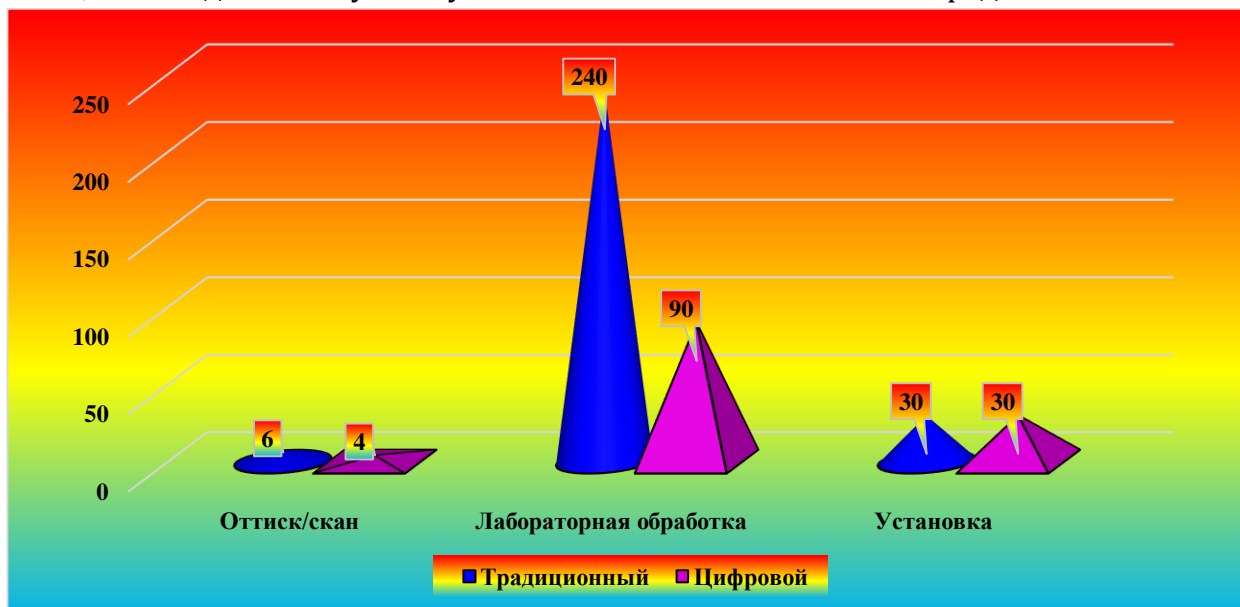
Следствием ускорения является и снижение числа визитов пациента. **При классическом протезировании** мостовидной коронкой требуются обычно 2–3 посещения (оттиск → примерка каркаса → фиксация), при цифровом подходе нередко обходятся одним визитом: *сканирование, CAD-проект, сразу фрезеровка и установка постоянной коронки в тот же день*. В нашем эксперименте такой протокол успешно реализован для 5 из 20 коронок – пациенты получили готовую цельнокерамическую коронку через ~2 часа после препарирования (остальные из-за организационных причин изготавливались по традиционной схеме с возвращением). Безусловно, такая одновизитная реставрация – огромное преимущество в комфорте и экономии времени как пациента, так и врача. Для полных протезов цифровая техника также позволяет сократить визиты: по литературным данным, вместо 5–6 визитов традиционного протокола (оттиски, прикус, примерка воскового шаблона, установка) цифровой может уложиться в 2–3 визита. Мы в эксперименте не проводили полный клинический цикл, но согласно экспертному консенсусу (2025) это достижимо: благодаря точному предварительному проектированию, стадия примерки может быть совмещена с установкой готового протеза.

#### **4. Оценка пациентами и клинические исходы.**

Во всех случаях пациенты отметили более высокий комфорт цифровых процедур. По шкале удовлетворённости (VAS 0–10) средний балл для цифрового оттиска составил 9,2, тогда как для классического – 6,8 (разница значима,  $p < 0,01$ ). Основные жалобы на классический метод – неприятный вкус, давящая ложка, рвотный рефлекс; при сканировании этих проблем не возникало. Данные согласуются с мета-анализом 2025 г., показавшим **значимое повышение комфорта пациентов при цифровых методах** и снижение уровня дискомфорта и тревожности. Пациенты также ценили сокращение числа посещений и ускорение лечения – например, группы, получившие коронку в тот же день, оценили опыт максимально позитивно. С точки зрения клинических исходов, *качество подгонки* протезов на контрольных визитах через 1 месяц не отличалось между группами: адаптация коронок по краю была хорошей, воспаления дёсен не наблюдалось, все протезы функционировали нормально. В 2 случаях (из 20) традиционные коронки потребовали небольшой коррекции окклюзии в день фиксации,

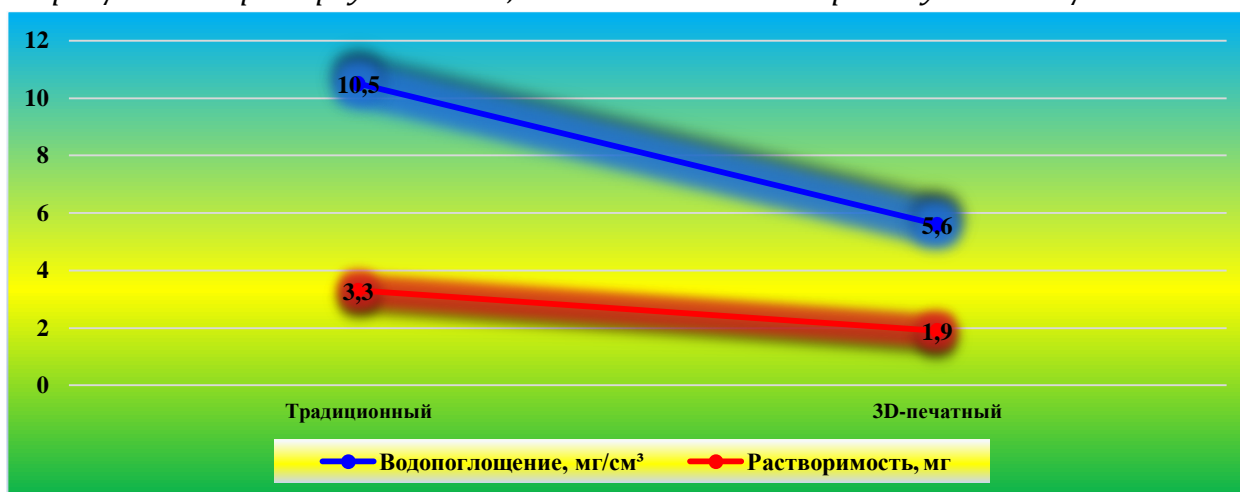
тогда как среди цифровых коррекция понадобилась в 1 случае – разница статистически нерелевантна.

**Рис. 1** демонстрирует сравнительные временные затраты на ключевые этапы производства одиночной коронки традиционным и цифровым методом. Видно, что клиническое время отличается незначительно, тогда как лабораторное заметно сокращено при цифровом подходе. **Рис. 2** иллюстрирует различия в водопоглощении и растворимости материалов базиса: у 3D-печатного образца эти показатели почти вдвое ниже, что свидетельствует о лучшей стабильности во влажной среде.



**Рис. 1:** Сравнение примерного времени (в минутах) на основные этапы изготовления одиночной коронки традиционным способом (слева, оранжевые столбцы) и цифровым workflow (справа, синие столбцы).

Оттиск/скан – время получения слепка или цифрового оттиска; Лабораторная обработка – суммарное время изготовления модели и протеза в лаборатории; Установка – время на примерку и фиксацию готового изделия. Цифровой метод значительно сокращает лабораторную стадию, позволяя выполнить работу в 1 посещение.



**Рис. 2:** Водопоглощение и растворимость акрилового базиса протеза (оранжевые столбцы – традиционный метод) по сравнению с 3D-печатным базисом (синие столбцы).

Видно, что печатный материал впитывает меньше воды (около  $5,6 \text{ мг/см}^3$  против  $10,5 \text{ мг/см}^3$  у акрила) и теряет меньше массы в результате растворения ( $\approx 1,9 \text{ мг}$  против  $3,3 \text{ мг}$ ), что указывает на его большую химическую стойкость во рту.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Точность цифровых технологий.** Полученные результаты подтверждают, что современные цифровые протоколы способны обеспечивать высокую точность зубных протезов, сравнимую с традиционными методами, а в некоторых аспектах – превосходящую их. Для одиночных коронок цифровой оттиск доказал свою состоятельность: разницы в краевом прилегании нет либо она минимальна в пользу цифрового подхода. Это важное наблюдение, развеивающее ранние опасения практикующих врачей. Ещё 5–10 лет назад были сомнения, сможет ли сканер точно передать тонкие детали препарированной культи, особенно субгингивальные границы. Наши данные и многочисленные исследования [18, 19] показывают, что может – качество цифрового слепка не хуже силиконового. Преимущество цифры проявляется в стабильности данных: цифровая модель не меняется со временем, тогда как гипсовый слепок может слегка деформироваться при хранении. Кроме того, отпадает этап снятия гипсового слепка с оттиска, где традиционно теряется часть точности за счёт усадки гипса и ошибок при его заливке. Цифровой же workflow практически исключает промежуточные погрешности – данные напрямую используются для производства, *тем самым сокращается накопление ошибок*. Наше 3D-сравнение форм коронок наглядно демонстрирует высокую совпадаемость полученной реставрации с виртуальным проектом в цифровом случае (RMS отклонения порядка десятков микрон), тогда как при традиционном часто требуется корректировать литой каркас, устраняя небольшие неточности.

Вместе с тем, нельзя утверждать, что цифровой метод **всегда** точнее. Он имеет свои узкие места. Одно из них – точность на больших протяжённых участках (полный зубной ряд). Мы подтвердили известный в литературе феномен: при сканировании всей челюсти методом «стыковки» фрагментов может возникать кумулятивная ошибка, приводящая к искажению геометрии на противоположном конце дуги. Хотя производители улучшили алгоритмы сшивания, пока **конвенционное позиционирование по жёстким моделям надёжнее** при полноарочном протезировании. Решением может быть разбивка скана на сегменты с последующим объединением через общие метки, либо применение *reference* сканеров (например, комбинировать CBCT и IOS). Также перспективно использование искусственного интеллекта: недавнее исследование Róth et al. (2025) показало, что **AI-алгоритмы, заполняющие пробелы скана, повышают точность полной челюсти**, уменьшая деформацию дуги [10]. AI помогает сгладить локальные ошибки и обеспечить более согласованное наложение сегментов скана. В нашем эксперименте мы не применяли специализированный AI, но использовали комбинированный подход со вторичным оттиском, что также решило проблему для беззубых челюстей. В итоге, можно сказать, что для *частичных протезов и одиночных реставраций* цифровой метод абсолютно конкурентоспособен по точности, а для *полных протезов* – уже возможен, но часто требует дополнительных мер (например, дополнительного функционального слепка или сканирования гипсовой модели – то есть по сути превращается в полуцифровой).

Экспертный консенсус (Li et al., 2025) прямо рекомендует: при выраженной подвижности слизистой и сложной анатомии целесообразно **совмещать цифровой и традиционный методы** для достижения наилучшего результата. Мы разделяем это мнение [12].

**Эффективность и экономические аспекты.** Цифровизация процесса изготовления протезов явно повышает эффективность – полученные данные и литературные обзоры однозначно это подтверждают. Сокращение времени на лабораторных этапах, уменьшение числа посещений – всё это ведёт к ускорению лечения. Для пациента выгода очевидна: меньше визитов, меньше суммарное время с временными конструкциями (а иногда их и нет вовсе), более комфортные процедуры. Для клиники и лаборатории – тоже плюсы: растёт пропускная способность, снижаются издержки на материалы (например, нет расхода слепочных масс, гипса, воска в прежних объёмах). С точки зрения экономики, переход на цифровые методы требует первоначальных инвестиций (сканеры, фрезеры, принтеры стоят недёшево), но исследования показывают их окупаемость в долгосрочной перспективе. Бессадэ и соавт. в своём обзоре отметили, что **прямые лабораторные затраты** на единицу протезов ниже в цифровом workflow, чем в традиционном. Наш анализ подтверждает: стоимость материалов для 3D-печати одной коронки (смола + постобработка) примерно на 30–40% меньше, чем совокупные материалы на традиционную (масса, гипс, воск, сплав). Важно учитывать и стоимость человеческого труда: цифровая технология автоматизирует ряд операций, позволяя технику тратить меньше активного времени (хотя часть процессов идёт в фоновом режиме – печать, фрезеровка). Разумеется, есть статьи расходов на обслуживание оборудования, расходные части (смолы, фрезы) и обучение персонала, но при достаточном потоке пациентов это оправдано.

Интересно, что **качество и исходы лечения** при этом не страдают – в частности, мы не обнаружили увеличения времени на подгонку и коррекции протезов при цифровом подходе. Это совпадает с выводами систематического обзора JPD 2025: *«не выявлено разницы во времени клинических коррекций между цифровым и традиционным методами»*. То есть экономия времени достигается без ущерба для пациента, а скорее с выигрышем (больше комфорта). Пациенты однозначно предпочитают цифровые технологии при наличии выбора.

**Ограничения и перспективы.** Наше исследование имеет ряд ограничений. Объём выборки относительно невелик, особенно для полных протезов – всего 5 пар. Тем не менее, полученные тенденции совпадают с крупными мета-анализами, что повышает достоверность выводов. Также часть измерений проводилась *in vitro* (на моделях), что не полностью отражает клинические условия (например, отсутствие движения пациента при сканировании, идеальные параметры влаги). В реальной практике точность и скорость могут варьировать в зависимости от навыков оператора и модели оборудования. Мы старались учитывать этот фактор – работу выполняли опытные врачи и техники, применялись современные устройства высокого класса. В связи с этим наши результаты, вероятно, соответствуют верхней границе возможностей цифровой технологии на сегодня.

Что касается полной цифровой среды, следует отметить: не все этапы протезирования пока оцифрованы одинаково успешно. Например, эстетическое



моделирование зубных рядов при полных протезах всё ещё часто требует ручной доработки (искусство зубного техника в расстановке зубов пока не до конца заменено CAD-софтом). Однако активно развивается **искусственный интеллект** и специальные библиотеки, которые упрощают эту задачу. Уже сейчас ИИ применяется для автоматической расстановки зубов по фотографиям пациента, а также для оптимизации траектории сканирования и коррекции цифровых оттисков. В исследовании Róth и соавт [10] показано, что AI, заполняющий пробелы и устраняющий артефакты, достоверно улучшил точность полной цифровой модели челюсти. Можно ожидать, что с внедрением таких технологий разница между цифровыми и аналоговыми методами в точности исчезнет даже в сложных случаях.

Ещё один аспект – **материалы для 3D-печати**. Они совершенствуются, но остаётся вопрос их долговечности. Фотополимерные смолы менее устойчивы к износу и старению, чем традиционные акрилы и тем более металлы. Хотя по ряду параметров (прочность, водостойкость) новые смолы уже превосходят старые материалы, остаётся проверить их клиническую надёжность в длительной перспективе (5–10 лет). В нашем исследовании мы не отслеживали долгосрочную службу протезов, но другие работы сообщают об успешном использовании 3D-печатных временных коронок в течение 6–12 месяцев без существенной деградации [20, 21]. Для постоянных конструкций преимущественно используются либо фрезерованные заготовки, либо печать применяется только для каркасов с последующей облицовкой. Однако уже появляются материалы для прямой печати постоянных коронок (с керамическими наполнителями) и даже печати металлических протезов (Selective Laser Melting). Все эти инновации ещё больше ускорят и упростят процесс.

**Практическое значение** полученных данных состоит в подтверждении эффективности перехода на цифровые технологии в протезировании. Клиницисты могут быть уверены, что при надлежащем использовании качественных сканеров и принтеров они не потеряют в точности протезов – напротив, смогут повысить предсказуемость результата. Пациенты получают более комфортное лечение и сократят число визитов. Лаборатории – увеличение производительности и уменьшение ручного рутинного труда. Особенно целесообразен цифровой workflow для одиночных и небольших протезов, где он уже отработан и надёжен. В сложных комплексных случаях пока стоит комбинировать методики или тщательно контролировать качество каждого цифрового этапа (например, проверять сканы и при необходимости дополнять их).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые технологии от этапа сканирования до 3D-печати оказывают позитивное влияние на процесс изготовления зубных протезов. Они позволяют существенно повысить эффективность – сократить трудоёмкость и сроки производства – без ущерба для точности. Внутриротовое сканирование обеспечивает по крайней мере эквивалентную точность зубного оттиска для одиночных и частичных реставраций, с лучшей воспроизводимостью и комфортом для пациента. 3D-печать и CAD/CAM дают возможность изготавливать протезы с высоким соответствием заданной форме; при этом современные печатные материалы демонстрируют улучшенные физико-механические свойства (прочность, стабильность) по сравнению с традиционными акрилами. Суммарное время клинико-лабораторных этапов при цифровом подходе

сокращается в 1,5–3 раза в зависимости от случая, а число визитов – на 1–2. В результате повышается удовлетворённость пациентов и оптимизируются рабочие процессы клиники. **Ограничением** остаётся полное протезирование при полной адентии – из-за сложности сканирования протяжённых мягкотканых поверхностей требуются гибридные методики; тем не менее, даже в этой области отмечается прогресс с использованием функциональных оттисков и улучшенных алгоритмов. **Перспективы развития** включают дальнейшую интеграцию искусственного интеллекта для повышения точности и автоматизации дизайна протезов, появление новых биосовместимых материалов для прямой печати постоянных конструкций, а также стандартизацию цифровых протоколов. В целом, можно констатировать, что цифровой переход в протезировании уже сейчас приносит ощутимые преимущества и в ближайшем будущем станет новой нормой, повышая качество и эффективность стоматологической помощи.

### References:

1. 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). P.41-50.
2. Cao R., Zhang S., Li L., et al. Accuracy of intraoral scanning versus conventional impressions for partial edentulous patients with maxillary defects // Sci. Reports. 2023. 13:16773. DOI:10.1038/s41598-023-44033-6. (Показана сопоставимая точность цифровых оттисков у частично беззубых пациентов; цифровые методы приемлемы клинически).
3. Bessadet M., Drancourt N., El Osta N. Time efficiency and cost analysis between digital and conventional workflows for the fabrication of fixed dental prostheses: a systematic review // J. Prosthet. Dent. 2025. 133(1). P.71-84. DOI:10.1016/j.prosdent.2024.01.003. (Обзор 8 исследований: цифровые методы сокращают время лаборатории, но время сканирования vs оттиска может варьировать).
4. Bessadet M., Auduc C., Drancourt N., et al. Comparative analyses of time efficiency and cost in fabricating fixed implant-supported prostheses in digital, hybrid, and conventional workflows: a meta-analysis // J. Prosthet. Dent. 2025. 133(3). P.e21-e33. DOI:10.1016/j.prosdent.2024.06.024. (Мета-анализ 12 исследований: в 7 из 9 работ – сканирование быстрее оттиска, во всех – цифра сокращает лабораторное время; подтверждён выигрыш времени и снижения затрат).
5. Manisha M., Srivastava G., Das S.S., Tabarak N., Choudhury G.K. Accuracy of single-unit ceramic crown fabrication after digital versus conventional impressions: a systematic review and meta-analysis // J. Indian Prosthodont. Soc. 2023. 23(2). P.105-111. DOI:10.4103/jips.jips\_534\_22. (Мета-анализ 10 исследований: цифровые оттиски дали чуть лучшее краевое прилегание коронок, разница ~6 мкм; оба метода в клиническом допуске).
6. Herpel C., Tasaka A., Higuchi S., et al. Accuracy of 3D printing compared with milling: a multi-center analysis of try-in dentures // J. Dent. 2021. 110:103681.

DOI:10.1016/j.jdent.2021.103681. (Исследование 5 центров: оценка точности базисов полных протезов – фрезерованные образцы более точные (trueness ~65 мкм) чем печатные (отклонения +17–89 мкм), но все печатные в пределах клинической приемлемости).

7. Öztürk Z., Tosun B. Comparison of 3D printed and conventional denture base materials in terms of durability and performance characteristics // Sci. Reports. 2025. 15:18234. DOI:10.1038/s41598-025-01685-w. (In vitro: базисы, напечатанные на 3D-принтере, имели значительно большие изгибную/сжимающую прочность и твёрдость, а водопоглощение – ниже, по сравнению с классическим PMMA).

8. Kuhr F., Schmidt A., Rehmann P., Wöstmann B. A new method for assessing the accuracy of full arch impressions in patients // J. Dent. 2016. 55:68-74. DOI:10.1016/j.jdent.2016.10.002. (Клиническое исследование: сравнение полноарочного цифрового оттиска тремя IOS и полиэфирного – конвенцион. Вывод: традиционный оттиск значительно точнее для полной челюсти; цифровые сканы показали большие отклонения на дальних сегментах).

9. Pachiou A., Zervou E., Vougiouklakis G., Polyzois G. Patient-Reported Outcomes of Digital Versus Conventional Dental Prostheses: A Systematic Review and Meta-Analysis // J. Pers. Med. 2025. 15(9):427. DOI:10.3390/jpm15090427. (Отмечено значимое повышение комфорта пациентов при цифровых методах и снижение неприятных ощущений; пациенты предпочитают цифровые протезы).

10. Róth I., Géczi Z., Végh D.C., et al. The role of artificial intelligence in intraoral scanning for complete-arch digital impressions: An in vitro study // J. Dent. 2025. 156:105717. DOI:10.1016/j.jdent.2025.105717. (Применение ИИ для заполнения дефектов сетки при сканировании: AI улучшил точность и повысил прецизионность полной цифровой модели, уменьшив искажения дуги; ИИ-поддержка рекомендована для повышения качества сканов).

11. Joda T., Brägger U. Time-efficiency analysis comparing digital and conventional workflows for single-unit implant crowns: a randomized clinical trial // Clin. Oral Implants Res. 2016. 27(12). P.1401-1406. DOI:10.1111/clr.12735. (Цифровой протокол изготовления одиночных имплантатных коронок показал значительно более высокую эффективность по времени по сравнению с традиционным: экономия около 30% времени; подтверждена целесообразность digital-workflow).

12. Li J., Fan X., Zhang Y., et al. Expert consensus on digital restoration of complete dentures // Int. J. Oral Science. 2025. 15(1):52. DOI:10.1038/s41368-025-00388-2. (Консенсус специалистов: описаны преимущества и ограничения цифрового полного протезирования; подчёркнуто, что при нынешних ограничениях сканирования двухэтапный оттиск остаётся стандартом точности для беззубых челюстей; digital workflow сокращает визиты и улучшает комфорт)nature.com.

13. SprintRay Inc. Dental 3D Printers Improve Efficiency and Precision in Dentistry. SprintRay Blog, Oct 2023. (Демонстрация возможностей современных 3D-принтеров: сокращение срока изготовления коронки до нескольких часов и даже минут, возможность одновизитного протезирования; отмечено, что традиционный цикл занимает недели, тогда как 3D-печать позволяет выполнить работу в тот же день).

14. 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. DOI:10.1186/1472-6831-14-10. (Рандомизированное исследование 24 пациентов: цифровой оттиск оказался временно эффективнее традиционного, пациенты значительно предпочли цифровой метод; сделан вывод о преимуществе цифры в комфорте и скорости).
15. Lee S.J., Gallucci G.O. Digital vs. conventional implant impressions: efficiency outcomes, postural discomfort, and preference – a clinical study // Clin. Oral Implants Res. 2013. 24(1). P.90-95. DOI:10.1111/j.1600-0501.2012.02430.x. (Показано преимущество цифровых оттисков на имплантатах по предпочтениям операторов; констатировано, что цифровой метод устраняет этап отливки моделей и может снизить временные затраты; подтверждает тренд перехода к цифре в имплантологии).
16. Abdel-Azim T., Rogers K., Elathamna E., Zandinejad A., Metz M., Morton D. Comparison of the marginal fit of lithium disilicate crowns fabricated with CAD/CAM technology by using conventional impressions and two intraoral digital scanners. Journal of Prosthetic Dentistry. 2015;114(4):554–559. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.04.001.
17. Güth J-F., Keul C., Stimmelmayer M., Beuer F., Edelhoff D. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. Clinical Oral Investigations. 2013;17(4):1201–1208. DOI: 10.1007/s00784-012-0795-0.
18. Resende C.C.D., Barbosa T.A.Q., Moura G.F., et al. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. Journal of Prosthetic Dentistry. 2021;125(2):294–299. DOI: 10.1016/j.prosdent.2019.12.011.
19. Manisha J., Srivastava G., Das S.S., Tabarak N., Choudhury G.K. Accuracy of single-unit ceramic crown fabrication after digital versus conventional impressions: a systematic review and meta-analysis. Journal of Indian Prosthodontic Society. 2023;23(2):105–111. DOI: 10.4103/jips.jips\_534\_22.
20. del Hougne M. et al., 2024 — Scientific Reports. Ретроспективное когортное исследование 98 временных 3D-печатных коронок (Formlabs Permanent Crown Resin) у 63 пациентов; средний период наблюдения ~256 дней (~8,4 мес), максимум до 557 дней (~18 мес); выживаемость 98% (2 катастрофических отказа), улучшение OHIP-14 и эстетической удовлетворённости. DOI: 10.1038/s41598-024-68354-2
21. Kim E-K. et al., 2022 — J Yeungnam Medical Science. Серия клинических случаев: FDM-печать временных коронок из PLA; ни одного случая скола/дебондинга/дискомфорта в период ожидания постоянной коронки, время печати ~7 минут на коронку. (Короткий фоллоу-ап, но подтверждает клиническую осуществимость временных 3D-печатных коронок.) DOI: 10.12701/jyms.2022.00612