На правах рукописи

Боровский Леонид Борисович

Повышение точности интраорального сканирования челюстей пациентов с дентальными имплантатами при использовании вспомогательного геометрического устройства

3.1.7. – стоматология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки РФ, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН **Лосев Фёдор Фёдорович**

Официальные оппоненты:
Олесова Валентина Николаевна – Заслуженный деятель науки РФ, доктор медицинских наук, профессор, зав. кафедрой стоматологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования Федерального Государственного бюджетного учреждения государственный научный центр «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России.

Салеева Гульшат Тауфиковна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой ортопедической стоматологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Ведущая организация:
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства Здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится **24 декабря 2026 года** в 10:00 на заседании диссертационного совета (21.1.079.02) Федерального государственного бюджетного учреждения национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации по адресу: 119021, Москва, ул. Тимура Фрунзе, д. 16 (конференц-зал).
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.cniis.ru Федерального государственного бюджетного учреждения Национальный медицинский исследовательский центр «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Министерства здравоохранения Российской Федерации.
Автореферат разослан 23 ноября 2026 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета,
кандидат медицинских наук Гусева Ирина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Протоколы несъёмного протезирования с опорой на имплантаты всё чаще сочетаются с CAD/CAM-технологиями и интраоральным сканированием. Цифровой рабочий процесс заметно сокращает количество аналоговых этапов, связанных с получением эластомерного оттиска и отливкой гипсовой модели, однако при полном отсутствии зубов его возможности напрямую упираются в точность регистрации положения имплантатов. Отсутствие ориентиров в виде зубов, протяжённые однородные участки дефекта зубного ряда в виде слизистой оболочки и подвижные мягкие ткани формируют неблагоприятные условия для интраорального сканирования и последующего их преобразования в рабочую модель, в результате чего при сканировании происходит искажение данных, что в последствии может повлиять на долгосрочный прогноз лечения.

Для протяжённых ортопедических конструкций с опорой на несколько дентальных имплантатов критически важно обеспечить максимально пассивную посадку на опоры. Даже относительно небольшие погрешности цифрового оттиска способны создавать дополнительные напряжения в комплексе «ортопедическая конструкция – дентальный имплантат – костная ткань» и тем самым повышать риск как биологических, так и технических осложнений. На этом фоне силиконовый оттиск по методике открытой ложки с последующей оцифровкой гипсовой модели лабораторным сканером по-прежнему рассматривается как основной метод выбора при протезировании в подобных условиях. Поэтому разработка подходов к повышению точности интраорального сканирования пациентов с полным отсутствием зубов имеет прямое практическое значение для работы с данной категорией пациентов.

Степень разработанности темы

В последние годы было опубликовано значительное число работ, посвящённых точности интраорального сканирования при полном отсутствии зубов и возможностям её повышения. Показано, что этот параметр зависит не

только от технологии и конкретной модели сканера, но и от типа и геометрии скан-маркера, протокола сканирования, длины и конфигурации зубной дуги, а также от наличия дополнительных ориентиров в зоне сканирования. Наиболее перспективным подходом в ряде исследований рассматривается введение в область сканирования вспомогательных геометрических устройств – ВГУ (англ. "*Auxiliary Geometric Devices*" – AGD), создающих дополнительные ориентиры для алгоритмов захвата и сшивания кадров, насыщая сканируемое поле дополнительными реперными элементами. В немногочисленных зарубежных *in vitro* исследованиях показано значительное повышение точности и воспроизводимости цифровых оттисков при использовании ВГУ по сравнению с цилиндрическими скан-маркерами.

При этом клинические данные о применении ВГУ в условиях *in vivo* пока остаются ограниченными, а прямых сравнений сканирования с ВГУ и без него относительно одного и того же референса в рамках одного исследования ранее не проводилось. Описанные в литературе конструкции ВГУ заметно различаются по форме, совместимости с системами дентальных имплантатов и способу изготовления; часть из них требует предварительного индивидуального моделирования под пациента, что требует дополнительного визита пациента до сканирования. В отечественных публикациях данное направление освещено лишь частично и не затрагивает исследования в клинических условиях.

Также остаётся неисследованным вопрос о степени переносимости лабораторных показателей точности вспомогательных устройств в клинические условия: различие между результатами *in vitro* и *in vivo* может быть обусловлено влиянием влажности, подвижности мягких тканей и особенностей клинической анатомии, однако количественная оценка этого различия в опубликованных работах по данной теме отсутствует.

Таким образом, сохраняется потребность в методе, пригодном для повседневного клинического применения при сканировании челюстей с установленными дентальными имплантатами при полном отсутствии зубов.

Цель исследования

Разработать и экспериментально-клинически обосновать методику повышения точности виртуальных моделей челюстей с дентальными имплантатами, получаемых методом интраорального сканирования.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. На основании данных литературы проанализировать факторы, влияющие на точность интраорального сканирования пациентов с полным отсутствием зубов, и систематизировать методы её повышения.
2. Разработать конструкцию ВГУ для интраорального сканирования челюстей пациентов с полным отсутствием зубов с установленными мультиюнитами и обосновать конструкционные особенности и состав разработанного устройства.
3. В условиях *in vitro* провести сравнительный анализ точности цифровой передачи трёх конфигураций ВГУ относительно единого эталона; верифицировать соответствие каждой конфигурации клинически допустимым порогам точности.
4. В условиях *in vivo* провести сравнительную оценку точности интраорального сканирования с ВГУ и со стандартными цилиндрическими скан-маркерами.
5. Сопоставить результаты применения ВГУ *in vitro* и *in vivo* для оценки влияния факторов среды полости рта на точность цифрового оттиска.
6. На основании полученных данных сформулировать практические рекомендации по клиническому применению разработанного ВГУ.

Научная новизна

Впервые разработано отечественное ВГУ для интраорального сканирования челюстей с полным отсутствием зубов с установленными дентальными

имплантатами и мульти-юнитами, не требующее предварительного индивидуального моделирования.

Впервые в рамках единого исследования проведено прямое сравнение точности интраорального сканирования с ВГУ и без него в клинических условиях *in vivo* с использованием единого метрологического референса – традиционного оттиска открытой ложкой, оцифрованного лабораторным сканером.

Впервые разработан и апробирован алгоритм сопоставления пространственного положения имплантатов при сравнении цифровых моделей, полученных с геометрически различающимися скан-маркерами, позволяющий объективно оценивать линейное и угловое отклонения.

Впервые получены количественные данные, демонстрирующие статистически значимое превосходство оптимальной конфигурации разработанного устройства над стандартными цилиндрическими скан-маркерами как в лабораторных, так и в клинических условиях, с полным соответствием клинически допустимым порогам точности при использовании оптимальной конфигурации против единичных случаев соответствия при использовании альтернативных решений.

Впервые в отечественной литературе получены сравнительные данные о влиянии геометрии скан-маркеров и вспомогательных устройств на точность цифрового оттиска при полной адентии с лабораторной верификацией и клинической апробацией.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений об интраоральном и лабораторном сканировании, механизмах формирования ошибки сшивания при интраоральном сканировании челюстей с полным отсутствием зубов и о роли конструктивных параметров вспомогательных устройств в повышении точности алгоритмов регистрации кадров. Результаты исследования углубляют научные основы применения цифровых протоколов в

ортопедической стоматологии, обосновывают методологический подход к сопоставлению разнородных конфигураций скан-маркеров и могут быть использованы при разработке стандартизированных критериев оценки точности цифровых оттисков при полной адентии.

Практическая значимость исследования определяется разработкой и испытанием вспомогательного геометрического устройства для сканирования челюстей с полным отсутствием зубов в лабораторных и клинических условиях, применение которого обеспечивает статистически значимое повышение точности интраорального сканирования по сравнению с использованием стандартных цилиндрических скан-маркеров. Полученные данные позволяют сформулировать поэтапный клинический протокол установки, сканирования и последующей обработки данных ВГУ для применения для изготовления протеза при реабилитации пациентов с полным отсутствием зубов.

Методология и методы исследования

Диссертация выполнена в соответствии с принципами и правилами доказательной медицины. Произведен обзор существующих дополнительных инструментов для сканирования полости рта пациентов с установленными дентальными имплантатами. Были определены и выделены международные и отечественные стандарты оценивания точности прилегания ортопедических конструкций с опорой на дентальные имплантаты. Были выделены и сформулированы физические и программные факторы, влияющие на процесс и конечный результат интраорального сканирования.

Была разработана и апробирована в лабораторных условиях конструкция вспомогательного устройства для сканирования. Для интеграции в программную среду прототипов и проведения измерений был изготовлен инструментарий для работы в CAD/CAM-ПО. В процессе разработки был утвержден состав устройства, а также 3 варианта скан-маркеров, различных по форме. Был разработан метод непрямого метрологического виртуального анализа одинаковых виртуальных моделей с различными по форме скан-маркерами. По

результатам измерений была выявлена наиболее эффективная конфигурация устройства и далее была использована в клиническом исследовании

В отделе ортопедической стоматологии и гнатологии было произведено пилотное исследование 5 пациентов с 4 установленными дентальными имплантатами на 1 челюсти при отсутствии зубов. У каждого пациента были получены эластомерные оттиски с использованием слепочных трансферов, из которых изготавливались гипсовые модели; произведено сканирование с использованием цилиндрических скан-маркеров, а также с использованием разработанного устройства.

Положения, выносимые на защиту

1. Сканирование челюсти пациента с полным отсутствием зубов со стандартными цилиндрическими скан-маркерами сопровождается дефицитом оптических ориентиров, что неизбежно приводит к накоплению кумулятивной пространственной погрешности при формировании виртуальной модели челюсти.

2. Применение ВГУ насыщает зону сканирования геометрически сложными, оптически выделяющимися поверхностями, что увеличивает количество реперных точек и достоверно снижает ошибку сшивания кадров при построении 3D-модели челюсти пациента и обеспечивает точную пространственную регистрацию установленных дентальных имплантатов.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена достаточным объёмом выборки (120 измерений на лабораторном этапе исследования, 20 измерений на клиническом этапе), применением метрологически аттестованного оборудования (интраоральный сканер 3Shape TRIOS 3, лабораторный сканер 3Shape E2), соответствием методики оценки точности требованиям ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 и международного стандарта ISO 12836:2015, а также корректным выбором статистических методов анализа с учётом характера распределения данных соответствовала принципам доказательной медицины.

Основные положения и результаты диссертационного исследования были доложены и представлены в форме устного доклада на XVII научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Научные достижения современной стоматологии и челюстно-лицевой хирургии», посвящённой памяти заслуженного деятеля науки РФ, доктора медицинских наук, профессора В.В. Рогинского 29 мая 2026 г., г. Москва.

Апробация диссертации проведена на совместном заседании сотрудников отдела дентальной имплантологии, хирургической стоматологии и пародонтологии, отдела ортопедической стоматологии и гнатологии, отдела инновационной терапевтической стоматологии и заболеваний слизистой оболочки рта, отдела терапевтической и профилактической стоматологии, отдела челюстно-лицевой хирургии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИСиЧЛХ» Минздрава России 18 июня 2026 года.

Личный вклад автора

Автор лично провел систематический анализ научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, нормативных актов и стандартов, используемых при сканировании в стоматологии. Сформулировал цель, задачи исследования, разработал план научного исследования, методологию. Автором были изготовлены все чертежи прототипов, осуществлялся контроль производства, был разработан инструментарий для CAD/CAM-ПО, произведены измерения и статистическая обработка данных. Производил сканирование гипсовых моделей и пациентов. На основании систематизированных полученных данных сформулировал выводы и практические рекомендации.

Внедрение результатов исследования

Результаты используются в лекционном курсе и практических занятиях с ординаторами отдела ортопедической стоматологии и гнатологии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИСиЧЛХ» Минздрава России.

Публикации

По результатам исследования опубликовано 2 научные работы в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных

Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 179 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, собственных результатов исследований, обсуждения полученных результатов и заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и списка литературы. Работа иллюстрирована 17 таблицами и 55 рисунками. Список литературы содержит 239 источников, из которых 45 отечественных и 194 зарубежных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ литературы и обоснование исследования

Выделены три направления повышения точности: объединение или модификация скан-маркеров; нанесение дополнительных ориентиров; применение вспомогательных элементов (устройств) в поле сканирования (*англ. Auxiliary Geometry Devices, AGD*). По результатам анализа публикаций за последние 5 лет, наиболее перспективным вариантом решения аппаратных ограничений интраорального сканера является применение вспомогательных геометрических устройств (ВГУ). Неоднородность конструкций и критериев оценки, а также ограниченность клинических данных обосновали разработку устройства и его экспериментально-клиническую оценку.

Материалы и методы

Исследование выполнено в отделе ортопедической стоматологии и гнатологии ФГБУ НМИЦ «ЦНИИСиЧЛХ» Минздрава России и включало разработку ВГУ, лабораторный этап in vitro и пилотный клинический этап in vivo. Прямое сканирование выполняли интраоральным сканером 3Shape TRIOS

3, непрямое – лабораторным сканером 3Shape E2. Стандартными маркерами служили цилиндрические скан-маркеры Lenmiriot Multi-Unit.

Разработанное ВГУ состоит из скан-маркеров, промежуточной контактной площадки и фиксирующих винтов. Спроектированы три варианта асимметричных скан-маркеров – СМ1, СМ2 и СМ3, различающихся формой и габаритами (рисунок 1). Устройство предназначено для работы с опорой на мульти-юнитах при полном отсутствии зубов.

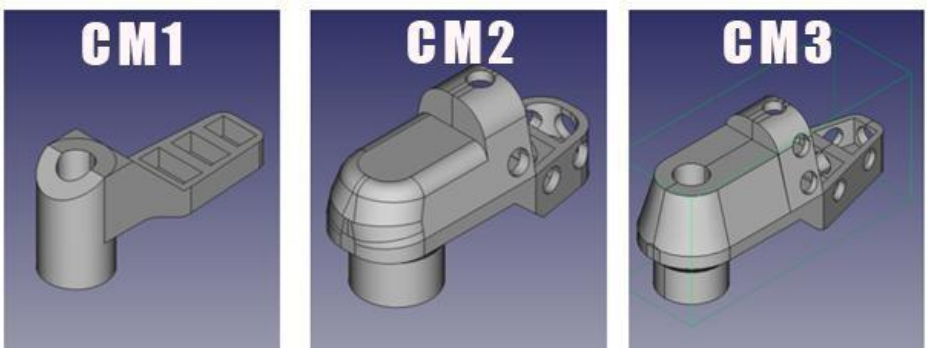


Рисунок 1 – Варианты экспериментальных скан-маркеров СМ1, СМ2 и СМ3 (слева направо)

Диаметр основания скан-маркера – 5 мм, диаметр винтовой шахты – 2,5 мм; образцы изготовлены под Nobel Multi-Unit Xeal. Площадка размером 23×33×2 мм имеет сквозные гексагональные перфорации, может быть индивидуализирована по размерам челюсти и опирается на плечи скан-маркеров, не касаясь слизистой оболочки. Отсутствие антиротационного индекса позволяет ориентировать плечи до окончательной фиксации винтами.

Прототипы напечатаны на принтере Phrozen Sonic 4K 2022 из смолы HARZ Labs Dental Peach, соединены с площадкой композитом EsFlow A2 без попадания материала на распознаваемую поверхность маркера (рисунок 2). Конструкцию собирают непосредственно на мульти-юнитах; после сканирования её снимают единым блоком, что позволяет установить аналоги и изготовить верификационную модель.



Рисунок 2 – Прототипы ВГУ на гипсовой модели: СМ1, СМ2 и СМ3 (слева направо)

На лабораторном этапе использована гипсовая модель верхней челюсти с четырьмя аналогами мульти-юнитов в проекциях зубов 1.2, 1.4, 2.2 и 2.4. Для каждой конфигурации выполнено 30 сканирований интраоральным сканером; в каждом оценены четыре позиции, то есть 120 позиционных измерений на конфигурацию и 360 в целом. Референсом служила цифровая модель той же челюсти, полученная лабораторным сканером со стандартными цилиндрическими скан-маркерами.

Для клинической апробации выбрана конфигурация СМ3. В пилотном исследовании участвовали 5 пациентов (4 мужчины, 1 женщина; возраст 51–74 года, средний – 62,4 года) с полным отсутствием зубов на верхней челюсти, четырьмя имплантатами Nobel Active TiUltra и мульти-юнитами Nobel Multi-Unit Xeal Conical Connection. Первичная стабильность имплантатов превышала 30 Н·см.

У каждого пациента выполнены два протокола сканирования: с ВГУ и со стандартными цилиндрическими скан-маркерами (контроль). В каждом протоколе получено 20 оценок положения платформ – по четыре позиции у пяти пациентов; эти 20 измерений не являются 20 независимыми пациентами. Сканирование выполнял один оператор. Референс получали по силиконовому оттиску методом открытой ложки (DMG Silagum-Putty и Silagum-Light, трансфер-чек) с последующей оцифровкой гипсовой модели лабораторным сканером. Скан-маркеры в полости рта показаны на рисунке 3.

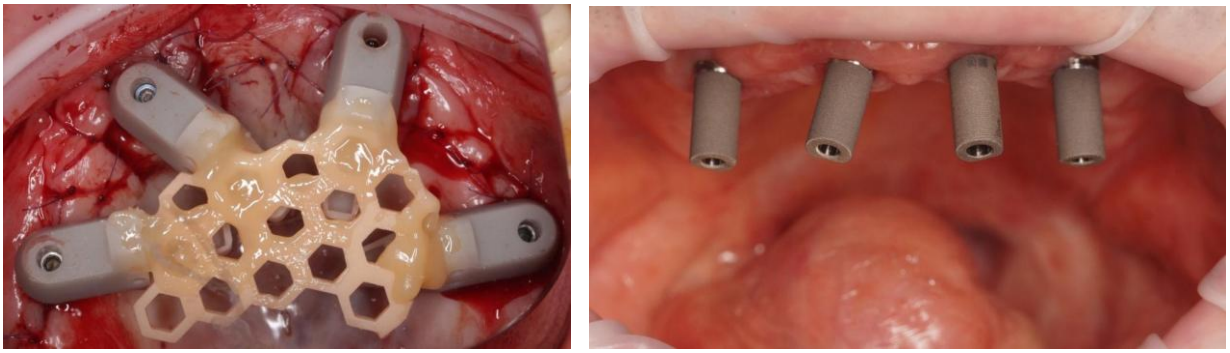


Рисунок 3 – ВГУ (слева) и стандартные цилиндрические скан-маркеры (справа) в полости рта

Для корректного сравнения геометрически различных скан-маркеров разработаны CAD-библиотеки и алгоритм виртуального замещения. Скан-маркеры распознавались по библиотечным образам, формировались виртуальные основания мульти-юнитов и экспортировались только их сегментированные поверхности – усечённые конусы с винтовыми шахтами (рисунок 4). Метрологический анализ проводился путем сравнения одинаковых объектов без окружающих мягкотканных структур.

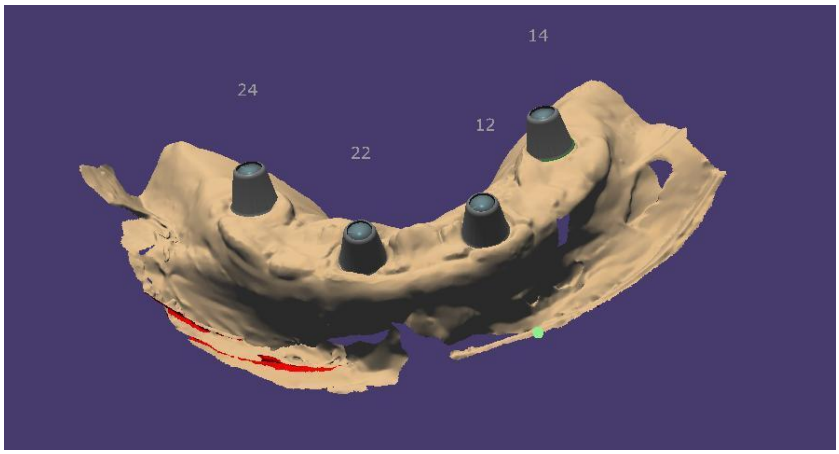


Рисунок 4 – Виртуальные основания мульти-юнитов после библиотечного распознавания скан-маркеров

Модели совмещали алгоритмом ICP (Iterative Closest Point); линейные отклонения рассчитывали в программе CloudCompare (облака по 1 000 000 точек, инструмент Cloud-to-Cloud Distance), центроиды и оси – в Geomagic Control X по аппроксимирующим усечённым конусам. Применяли три показателя: TotRMS, мкм – среднеквадратическое отклонение поверхностей оснований; cRMS, мкм –

линейное отклонение центроидов оснований; Δα, ° – угол между осями оснований.

Использован комплексный критерий приемлемости: одновременно TotRMS ≤ 150 мкм, cRMS ≤ 100 мкм и Δα ≤ 1,0°. Он характеризует точность регистрации относительно референса, но не заменяет контроль посадки готового протеза. Геометрию прототипов оценивали по площади поверхности и плотности полигональной сетки, а библиотечное сопоставление – по среднему отклонению (Mean) и SD.

Статистическую обработку выполняли в Microsoft Excel 2021 с надстройкой Real Statistics Resource Pack. Определяли M, SD, Me, 95% ДИ и CV; нормальность проверяли критериями Шапиро–Уилка и Д'Агостино–Пирсона, однородность дисперсий – критерием Левена. Применяли критерий Краскела–Уоллиса с апостериорными сравнениями Данна (поправка Бонферрони), критерий Манна–Уитни, однофакторный дисперсионный анализ с методом Тьюки и двусторонний точный критерий Фишера. Критический уровень значимости α = 0,05.

Результаты лабораторного исследования

Основные лабораторные показатели приведены в таблице 1; поскольку часть распределений отличалась от нормального, указаны M ± SD и медиана.

Таблица 1 – Показатели точности трёх конфигураций ВГУ in vitro

Показатель	Вариант	M ± SD	Me	95% ДИ
TotRMS, мкм	CM1	121,19 ± 32,39	126,89	115,40–126,99
	CM2	87,94 ± 30,15	94,62	82,54–93,33
	CM3	40,53 ± 3,70	40,12	39,87–41,19
cRMS, мкм	CM1	155,08 ± 30,65	161,89	149,60–160,56
	CM2	135,59 ± 37,89	137,23	128,81–142,37
	CM3	31,82 ± 2,82	31,62	31,32–32,33
Δα, °	CM1	1,299 ± 0,952	0,86	1,128–1,469
	CM2	1,866 ± 0,375	1,81	1,799–1,933
	CM3	0,452 ± 0,159	0,43	0,423–0,480

Примечание. Каждая конфигурация: 30 сканов × 4 позиции, 120 позиционных измерений. Данные таблицы 5 диссертации.

Минимальные значения всех трёх показателей получены при СМ3. Среднее TotRMS у СМ3 было в 3,0 раза меньше, чем у СМ1, и в 2,2 раза меньше, чем у СМ2; среднее cRMS – соответственно в 4,9 и 4,3 раза. CV линейных показателей СМ3 составил 9,12% и 8,86%, углового – 35,22%. По критерию Краскела–Уоллиса выявлены общие различия (TotRMS H = 225,30; cRMS H = 246,46; Δα H = 270,09; df = 2; $p < 0,001$); при сравнении СМ3 с СМ1 и СМ2 по методу Данна $p < 0,001$ по всем показателям.

Переход от СМ1 к СМ2 уменьшал линейные, но увеличивал угловые отклонения (среднее Δα 1,299 и 1,866°). Следовательно, изменение формы и габаритов не гарантирует одновременного улучшения всех показателей. Для СМ3 среднее TotRMS по позициям составило от 37,22 ± 2,22 мкм (1.4) до 45,07 ± 2,35 мкм (2.4), размах – 7,85 мкм (у СМ1 – 76,51 мкм, у СМ2 – 69,69 мкм). Все позиции СМ3 соответствовали принятым порогам; СМ2 не соответствовал совокупности порогов ни в одном измерении (рисунок 5, 6).

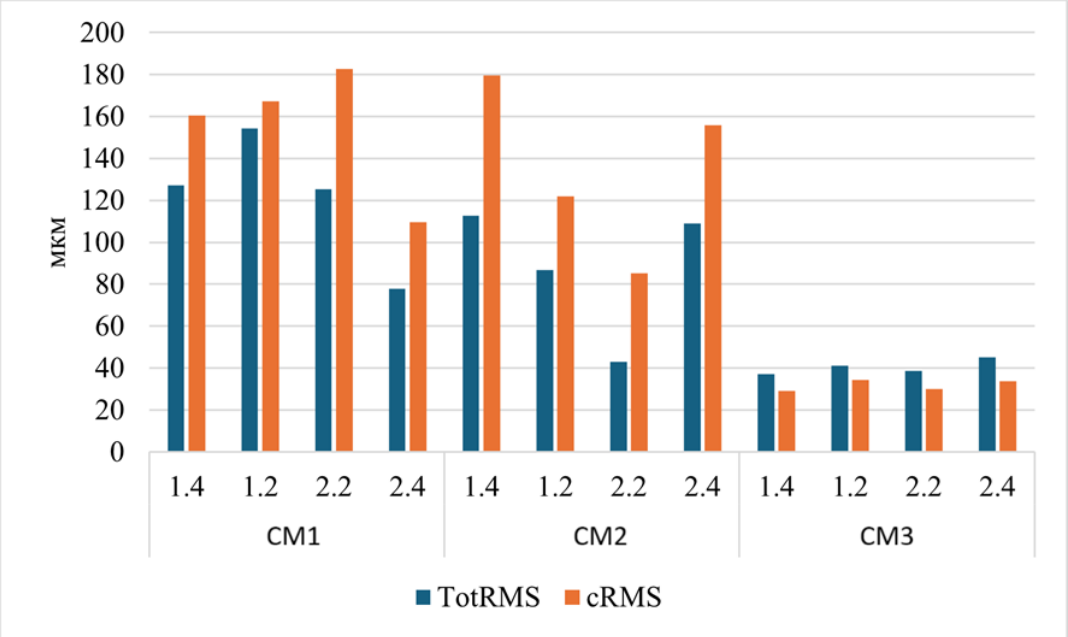


Рисунок 5 – Сравнение точности позиционирования по метрикам TotRMS и cRMS для трёх вариантов прототипов вспомогательных устройств по позициям протетических платформ

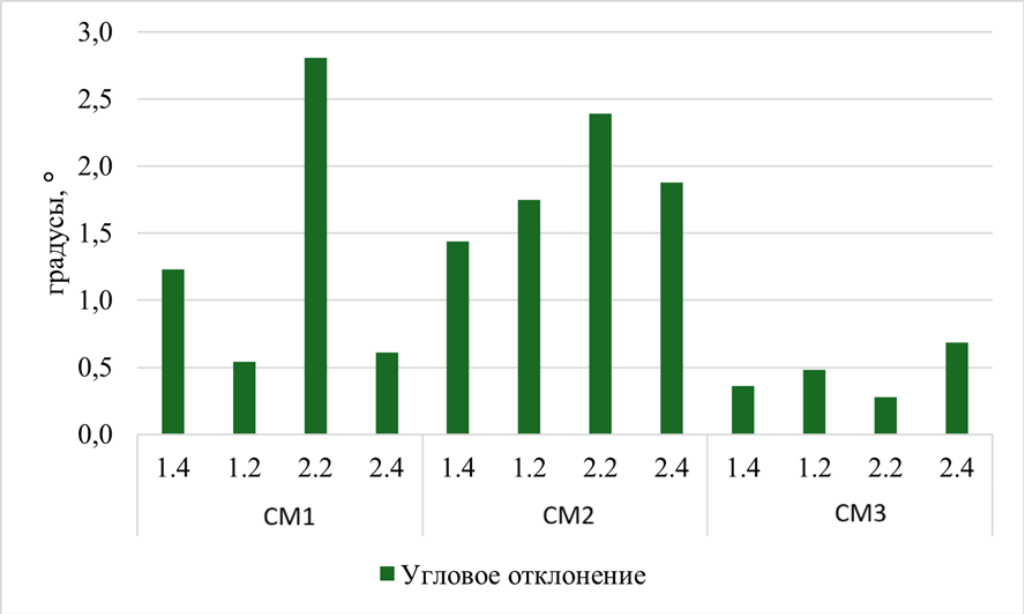


Рисунок 6 – Сравнение точности позиционирования по угловому отклонению для трёх вариантов прототипов вспомогательных устройств по позициям протетических платформ

Геометрические характеристики виртуальных моделей прототипов приведены в таблице 2. Площадь поверхности СМ3 превышала площадь СМ1 на 39,8% и СМ2 на 24,8%; плотность сетки была наибольшей.

Таблица 2 – Геометрические характеристики полигональных сеток прототипов

Параметр	СМ1	СМ2	СМ3
Площадь поверхности, кв. ед.	475,12	532,14	664,26
Средняя площадь треугольника, кв. ед.	0,01798	0,02086	0,01266
Расчётное число треугольников	≈ 26 424	≈ 25 504	≈ 52 460
Плотность сетки, тр./кв. ед.	55,6	47,9	79,0

При сопоставлении библиотечных образов с физическими маркерами среднее отклонение составило −10,78 мкм для цилиндрического маркера, −7,26 мкм для СМ1, 10,96 мкм для СМ2 и 31,36 мкм для СМ3; SD – 31,31; 42,44; 126,7 и 40,72 мкм соответственно. Следовательно, преимущество СМ3 по итоговым метрикам нельзя отождествлять с минимальной погрешностью отдельного этапа библиотечного наложения. СМ1 и СМ2 исключены из дальнейшей клинической апробации (рисунок 7).

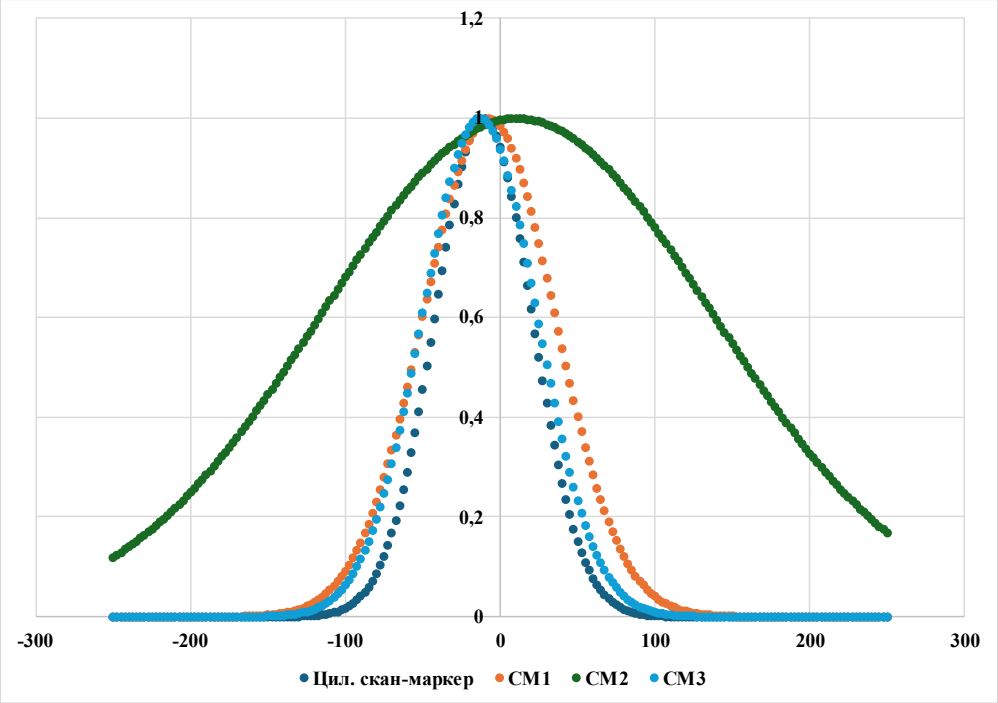


Рисунок 7 – Сравнение точности позиционирования по угловому отклонению для трёх вариантов прототипов вспомогательных устройств по позициям протетических платформ

Результаты клинического исследования

ВГУ обеспечивало меньшие отклонения, чем сканирование со стандартными маркерами (таблица 3): среднее TotRMS уменьшилось со 178,08 ± 52,97 до 45,28 ± 7,55 мкм, cRMS – со 123,42 ± 39,26 до 39,50 ± 8,13 мкм, Δα – с 1,054 ± 0,294 до 0,516 ± 0,137°.

Таблица 3 – Показатели точности в группах ВГУ и контроля in vivo

Показатель	Протокол	M ± SD	Me	95% ДИ
TotRMS, мкм	Контроль	178,08 ± 52,97	158,25	153,29–202,87
	ВГУ	45,28 ± 7,55	44,24	41,75–48,82
cRMS, мкм	Контроль	123,42 ± 39,26	125,23	105,04–141,79
	ВГУ	39,50 ± 8,13	37,00	35,70–43,31
Δα, °	Контроль	1,054 ± 0,294	1,034	0,916–1,192
	ВГУ	0,516 ± 0,137	0,501	0,452–0,580

Примечание. Данные таблицы 11 диссертации. Каждый протокол: 5 пациентов × 4 позиции, 20 позиционных измерений.

Среднее TotRMS снизилось на 74,6% (в 3,9 раза), среднее Δα – примерно на 51%. CV TotRMS уменьшился с 29,75 до 16,68%. По критерию Манна–Уитни различия значимы для всех показателей (TotRMS U = 0,00; cRMS U = 2,00; Δα U = 16,00; $p < 0,001$). Интерпретация ограничена пилотным объёмом выборки и

наличием нескольких позиций у одного пациента. Распределения TotRMS, cRMS и Δα показаны на рисунках 8, 9 и 10.

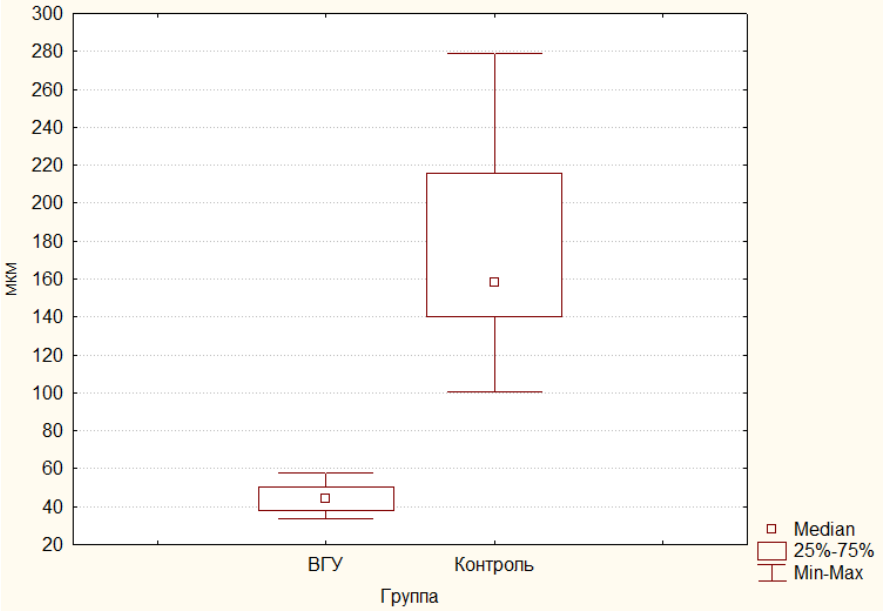


Рисунок 8 – Распределение TotRMS в группах ВГУ и контроля in vivo (20 позиционных измерений в группе)

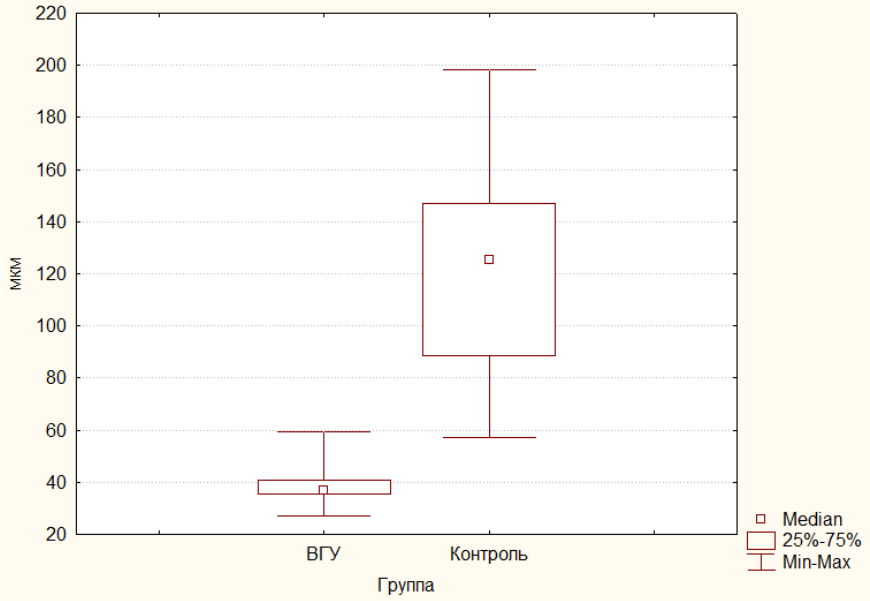


Рисунок 9 – Распределение cRMS в группах ВГУ и контроля in vivo (20 позиционных измерений в группе)

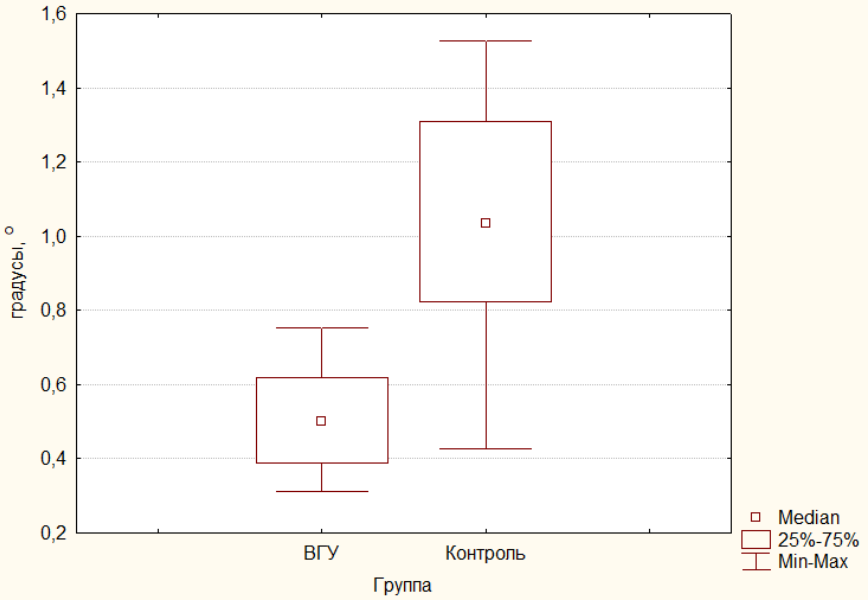


Рисунок 10 – Распределение углового отклонения в группах ВГУ и контроля in vivo (20 позиционных измерений в группе)

Средние по пациентам значения TotRMS составляли 42,37–51,99 мкм при ВГУ и 155,30–196,98 мкм в контроле; Δα – 0,480–0,566° и 0,941–1,237° соответственно. Значимых различий между пациентами не выявлено ($p > 0,05$). При ВГУ угловая ошибка во всех 20 позициях оставалась ниже 1,0°.

Наибольшее среднее TotRMS зарегистрировано в позиции 2.4: 49,22 мкм при ВГУ и 231,45 мкм в контроле. При ВГУ значимых межпозиционных различий по TotRMS и cRMS не найдено ($p = 0,174$ и $p = 0,295$); в контроле различия по TotRMS значимы ($F = 4,744$; $p = 0,015$). Однако по Δα при ВГУ межпозиционные различия сохранялись ($F = 5,850$; $p = 0,007$): в позиции 2.4 значение выше, чем в 1.2 на 0,237° ($p = 0,011$) и в 2.2 на 0,232° ($p = 0,013$), оставаясь в пределах порога.

Комплексному критерию приемлемости соответствовали 20 из 20 позиций при ВГУ и 3 из 20 в контроле (таблица 4; двусторонний точный критерий Фишера, $p = 0,001$). Соответствие порогам описывает цифровую регистрацию и не равнозначно доказанной пассивной посадке готового каркаса, но увеличивает потенциальную точность итоговой конструкции. Применение вспомогательного геометрического устройства в полости рта пациента продемонстрировано на рисунке 11.

Таблица 4 – Соответствие комплексному критерию приемлемости in vivo

Результат	ВГУ, n (%)	Контроль, n (%)
Соответствует	20 (100%)	3 (15%)
Не соответствует	0 (0%)	17 (85%)

Примечание. Одновременно TotRMS ≤ 150 мкм, cRMS ≤ 100 мкм, Δα ≤ 1,0°. Данные таблицы 17 диссертации; n – оценённые позиции, а не пациенты.

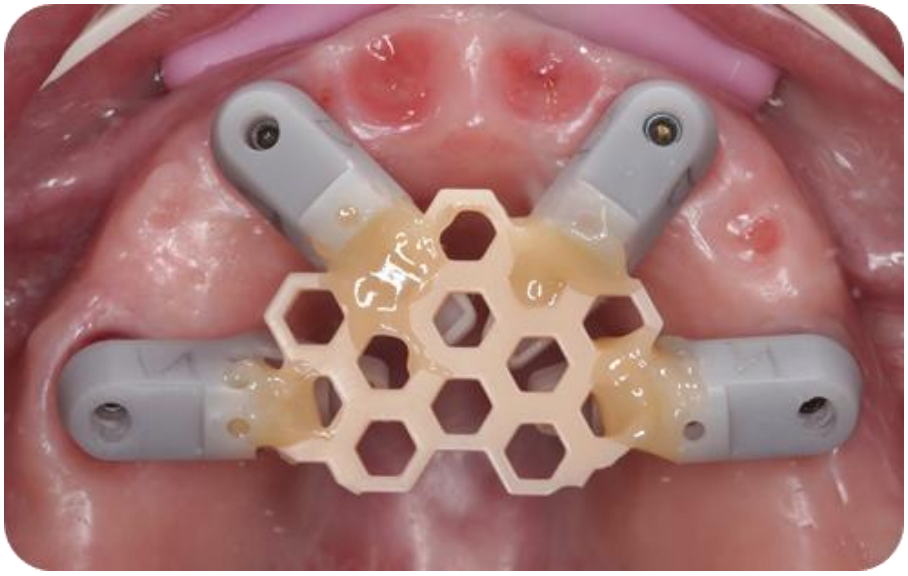


Рисунок 11 – Установленное вспомогательное геометрическое устройство в полости рта пациента

Сопоставление результатов in vitro и in vivo

Сопоставлены лабораторная группа СМ3 (120 позиционных измерений) и клиническая группа ВГУ (20 позиционных измерений). При переходе в полость рта абсолютные значения всех показателей возрастали, оставаясь существенно ниже принятых порогов (таблица 5).

Таблица 5 – Точность оптимальной конфигурации ВГУ на двух этапах

Показатель	In vitro, M ± SD	In vivo, M ± SD	Me in vitro / in vivo
TotRMS, мкм	40,53 ± 3,70	45,28 ± 7,55	40,12 / 44,24
cRMS, мкм	31,82 ± 2,82	39,50 ± 8,13	31,62 / 37,00
Δα, °	0,452 ± 0,159	0,516 ± 0,137	0,43 / 0,501

Примечание. По таблицам 5 и 11 диссертации; объёмы групп указаны в позиционных измерениях.

Различия между этапами значимы: TotRMS – U = 778,50; p = 0,012; cRMS – U = 324,00; p < 0,001; Δα – U = 865,00; p = 0,046. Наиболее выражен сдвиг линейного положения центроидов, угловая регистрация изменилась меньше. Сравнение характеризует различие этапов, но не позволяет раздельно оценить

вклад слюны, подвижности слизистой и других факторов. В обоих этапах наибольшее TotRMS отмечено в позиции 2.4: 45,07 ± 2,35 мкм in vitro и 49,22 мкм in vivo.

Обсуждение и ограничения

Асимметричные поверхности разработанных скан-маркеров и площадки ВГУ создают дополнительные ориентиры и перекрывают промежутки между опорами. Итоговая точность зависит от всей цепочки: изготовления и фиксации устройства, оптического захвата, сшивания и библиотечного распознавания. Результаты CM2 подтверждают необходимость совместного анализа линейной и угловой погрешности.

Референсом служило лабораторное сканирование гипсовой модели, а не координатно-измерительная машина; клинический референс включал этапы оттиска и изготовления модели. Поэтому результаты описывают расхождение с принятым опорным методом, а не абсолютную ошибку. Клиническая апробация носила пилотный характер: пять пациентов с четырьмя имплантатами на верхней челюсти, один оператор, один сканер и одно программное обеспечение. Это стандартизировало условия, но ограничивает обобщение результатов.

Посадку готовых каркасов, частоту осложнений, срок службы протезов и экономическую эффективность не оценивали. Повышение точности цифровой регистрации рассматривается как предпосылка улучшения протезирования, но не как прямое доказательство улучшения отдалённых исходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что дефицит устойчивых оптических ориентиров при сканировании челюсти пациентов с полным отсутствием зубов можно компенсировать конструктивно, не прибегая к индивидуальному CAD-моделированию. Разработанное ВГУ с оптимальной, по результатам лабораторного исследования, конфигурацией скан-маркеров достоверно уменьшило линейные и угловые отклонения регистрации положения протетических платформ дентальных имплантатов. При испытании в

клинических условиях погрешности возрастали, но оставались в пределах допустимых порогов точности и значительно превосходили результаты стандартного протокола сканирования. Остаточная позиционная зависимость в области позиции 2.4, пилотный объем выборки и отсутствие оценки посадки готовых каркасов определяют направления дальнейшей работы: расширение клинической выборки, включение в исследование нижней челюсти, иное количество установленных дентальных имплантатов, участие разных операторов при сканировании и расширение количества сканеров в исследовании.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа литературы систематизированы аппаратные, программные и клинические факторы, а также влияние навыка оператора на точность интраорального сканирования при полном отсутствии зубов. Выделены три направления её повышения: объединение или модификация скан-маркеров, нанесение дополнительных ориентиров и применение вспомогательных геометрических устройств. Дефицит оптических ориентиров приводит к накоплению пространственной погрешности и обосновывает применение дополнительных геометрических элементов.

2. Разработано ВГУ, включающее асимметричные скан-маркеры, промежуточную перфорированную площадку и фиксирующие винты. Дополнительные плечи скан-маркеров ориентируют орально и соединяют с площадкой светоотверждаемым композитом без контакта площадки со слизистой оболочкой. Устройство собирается непосредственно на мульти-юнитах и не требует предварительного индивидуального CAD-моделирования.

3. В условиях in vitro конфигурация СМ3 обеспечила статистически значимо меньшие отклонения относительно единого референса, чем СМ1 и СМ2: TotRMS – 40,53 ± 3,70 мкм, cRMS – 31,82 ± 2,82 мкм, $\Delta\alpha$ – 0,452 ± 0,159° ($p < 0,001$ по всем показателям). Все оценённые позиции СМ3 соответствовали критериям (TotRMS ≤ 150 мкм, cRMS ≤ 100 мкм и $\Delta\alpha \leq 1,0°$), что послужило основанием выбора СМ3 для клинической апробации.

4. В пилотном исследовании пяти пациентов с полным отсутствием зубов на верхней челюсти и четырьмя имплантатами применение ВГУ в сравнении с цилиндрическими скан-маркерами уменьшало среднее TotRMS со 178,08 ± 52,97 до 45,28 ± 7,55 мкм, cRMS – со 123,42 ± 39,26 до 39,50 ± 8,13 мкм, Δα – с 1,054 ± 0,294 до 0,516 ± 0,137°. Комплексному критерию соответствовали 20 из 20 позиций при ВГУ и 3 из 20 в контроле. Значимых межпозиционных различий линейных показателей при ВГУ не выявлено, но позиционная зависимость углового отклонения сохранялась ($p = 0,007$); в контроле наибольшая погрешность отмечена в позиции 2.4.

5. При переходе от лабораторного к клиническому этапу средние значения возрастали: TotRMS – с 40,53 до 45,28 мкм, cRMS – с 31,82 до 39,50 мкм, Δα – с 0,452 до 0,516°. Все оценённые позиции клинической группы сохраняли соответствие принятым порогам. Раздельный вклад отдельных факторов полости рта данным дизайном не определялся.

6. Разработан клинический протокол применения ВГУ: сканирование мягких тканей до установки или после снятия устройства, фиксация скан-маркеров на мульти-юнитах, объединение с площадкой, сканирование, совмещение данных и при необходимости изготовление верификационной модели.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При протяженном интраоральном сканировании челюсти с мульти-юнитами для протяжённого протеза с винтовой фиксацией целесообразно использовать конфигурацию СМ3 в составе ВГУ. Клиническая апробация выполнена на верхней челюсти с четырьмя имплантатами; расширение показаний требует учёта ограничений исследования.

2. ВГУ может рассматриваться в протоколах немедленной нагрузки, так как не требует контакта оттискного материала с раневой поверхностью. Сокращение сроков лечения и частоту осложнений необходимо оценивать отдельно.

3. Скан-маркеры последовательно фиксируют на мульти-юнитах, ориентируя дополнительные плечи орально; площадку располагают на плечах без контакта со слизистой и соединяют с ними светоотверждаемым композитом через перфорации, не загрязняя распознаваемую поверхность маркера.

4. До фиксации ВГУ или после его выведения следует получить скан мягких тканей, перекрываемых устройством, и совместить его с основным сканом.

5. Положение элементов и размеры площадки индивидуализируют непосредственно в полости рта; предварительное индивидуальное CAD-моделирование и дополнительный визит не требуются.

6. Устройство извлекают единым блоком; при необходимости присоединяются аналоги и производится гипсовка для физической проверки посадки конструкции, изготовленной в цифровом протоколе.

7. Применение ВГУ при частичной адентии (включенных дефектах) не рекомендуется: зубной ряд уже обеспечивает ориентиры для сканера.

8. Соединения с антиротационным индексом нецелесообразны для предложенной конструкции, так как фиксированная ориентация выступающих частей препятствует установке площадки.

9. В дистальных отделах, особенно в области 2.4, необходим повышенный визуальный контроль качества сканирования – остаточная позиционная зависимость угловой ошибки сохраняется и при ВГУ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лосев, Ф. Ф. Анализ дополнительных методов повышения точности внутриротового сканирования у пациентов с полной адентией для изготовления несъёмных зубных протезов / Ф. Ф. Лосев, Л. Б. Боровский // Стоматология. – 2025. – Т. 104, № 6. – С. 49–54. – DOI: 10.17116/stomat202510406149.

2. Лосев, Ф. Ф. Создание вспомогательного устройства для внутриротового сканирования беззубых челюстей с установленными дентальными

имплантатами / Ф. Ф. Лосев, Л. Б. Боровский, М. С. Котик // Стоматология. – 2026. – Т. 105, № 3. – С. 38–46. – DOI: 10.17116/stomat202610503138.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВГУ – вспомогательное геометрическое устройство;

СМ1, СМ2, СМ3 – экспериментальные варианты скан-маркеров.

TotRMS – среднеквадратическое отклонение поверхностей;

cRMS – линейное отклонение центроидов;

Δα – угловое отклонение осей оснований;

M – среднее арифметическое;

SD – стандартное отклонение;

Me – медиана;

CV – коэффициент вариации;

CAD – система автоматизированного проектирования;

ДИ – доверительный интервал;

ПО – программное обеспечение.