

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**РЫБАКОВ  
АЛЕКСАНДР**

**Оптимизация ортодонтического лечения на основе нейронных сетей, анализа  
конечными элементами и цифровых карт слизистой полости рта**

3.1.7. Стоматология

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

Соколович Наталия Александровна

Доктор медицинских наук

Санкт-Петербург – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	15
1.1 Методы оценки биотипа слизистой .....	15
1.2 Терапия Прозрачных Элайнеров. Анализ конечными элементами.....	21
1.3 Значение биотипа СОПР при ортодонтическом лечении .....	32
1.4 Применение ИИ в сегментации трехмерных моделей по данным КЛКТ ...	37
1.4.1 Глубокое обучение.....	47
1.4.2 Сегментация медицинских изображений .....	47
1.4.3 Обучение нейронных сетей.....	52
1.4.4 Показатели оценки .....	55
1.4.5 Современные методы сегментации медицинских изображений .....	56
<b>Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ</b> .....	67
2.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов.....	69
2.2 Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами.....	71
2.3 Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР .....	72
2.4 Обучение нейронных сетей.....	73
2.5 Лабораторный этап .....	74
2.6 Клинико-диагностический прием.....	76
2.6.1 Фотопротокол и диагностика.....	76
2.6.2 Оценка наличия воспаления СОПР .....	85
<b>Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	89
3.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов.....	89
3.1.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов.....	94
3.2 Сегментация данных КТ.....	94
3.2.1 Сегментация данных КТ ручным методом .....	96

3.2.2	Создание цифровой модели биотипа СОПР .....	108
3.2.3	Сравнение методик сегментации данных КТ.....	113
3.2.4	Сегментация данных КТ.....	120
3.3	Сегментация при помощи ИИ.....	122
3.3.1	Нормализация данных КТ .....	122
3.3.2	Аннотация данных слоев КТ .....	124
3.3.3	Увеличение объема данных обучения ИИ .....	125
3.3.4	Семантическая сегментация изображений с помощью U-Net .....	126
3.3.5	Сегментация КТ при помощи ИИ .....	129
3.4	Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР .....	131
3.4.1	Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР .....	137
3.5	Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами.....	139
3.5.1	Реверсивное моделирование .....	148
3.5.2	Доклиническое моделирование передвижения зубов.....	154
3.5.3	Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами	160
3.6	Клинико-лабораторные методы .....	163
3.6.1	Протокол лечения на элайнерах .....	175
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>179</b>
<b>ВЫВОДЫ .....</b>		<b>190</b>
<b>КЛИНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....</b>		<b>192</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>		<b>194</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>		<b>195</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Цифровые технологии стали неотъемлемой частью повседневной жизни. Инновации, особенно в цифровой сфере, приобретают беспрецедентные масштабы, возможности использования цифровых решений в области стоматологии огромны.

Это означает, что в будущем целая армия новых технологий произведет революцию в стоматологии и во всем нашем отношении к здоровью полости рта. Поиск достижений в области стоматологии не прекращается, поэтому важно принимать новые технологии и быть осведомленным о связанных с ними рисках и преимуществах при использовании. Осознание того, что новые и появляющиеся технологические инновации могут предоставить пациентам альтернативные методы лечения, одновременно улучшая рабочий процесс, увеличивая производительность и повышая качество обслуживания, уже не за горами. Как и любая другая отрасль здравоохранения, стоматология за последние несколько лет также полностью преобразилась благодаря внедрению передовых компьютерных технологий, новых мер профилактики заболеваний и усовершенствованию методов диагностики [264].

Аномалии прикуса у пациентов имеют весьма высокую распространенность, что свидетельствует о необходимости поиска эффективного ортодонтического лечения, не имеющего рецидивов [5, 32].

На данный момент идея и разработка новых современных методов в эффективном исправлении прикуса и их успешное применение является актуальной и востребованной задачей [225, 261, 273].

Существуют различные методики исправления прикуса. Очевидно, что в настоящее время на первое место выходят наиболее технологичные, то есть с применением цифровых технологий, что позволяет сделать их полностью предсказуемыми. На данное время таковой методикой является лечение на элайнерах [104, 170, 192].

Однако следует обратить особое внимание на возможность развития заболеваний пародонта при использовании ортопедических и ортодонтических конструкций по причине наличия нефизиологического давления на слизистую оболочку полости рта, плохой гигиены полости рта и неоптимальной обрезки краев конструкций элайнеров [4, 44].

В литературе, описанной выше, не были найдены оптимальные методы определения биотипа слизистой полости рта. Инвазивные методы при ортодонтическом лечении не являются рациональным решением. При этом существующие методы определения биотипа слишком затратны по времени и при определенных условиях могут давать некорректную информацию. Это может произойти в тех случаях, когда уже существует рецессия десны, либо присутствует ретинированное положение зуба, либо были проведены хирургические вмешательства [218].

Отсюда следует, что поиск новых методов комплексного лечения ортодонтических пациентов на элайнерах требует создания нового эффективного автоматизированного протокола лечения [284].

Современные методики предоставляют возможность внедрения качественных индивидуализированных методов лечения ортодонтических пациентов и могут служить основой для новых методов эффективного планирования комплаентных и некомплаентных пациентов с максимально предсказуемым результатом ортодонтического лечения [53, 59, 67, 87, 104, 189, 243, 246, 269, 281]. При использовании современных цифровых технологий и их комбинаций [85, 180, 304] появляется возможность проведения детального анализа и прогнозирования рисков осложнений, таких как рецессия десны вследствие приложения чрезмерных сил на перемещаемый зуб или неправильного планирования и выбора топологии элайнера, а также избыточного давления на десну с тонким биотипом. Отсюда следует, для того чтобы избежать осложнений в

виде рецессии десны, крайне необходим точный и простой метод определения биотипа слизистой оболочки полости рта [232]. Традиционные методы определения биотипа слизистой оболочки полости рта являются точечными, но не отображают всей картины толщины слизистой оболочки полости рта. При наличии цифровых протоколов и достаточного количества данных достигается объективизация, благодаря чему получается более точный диагноз и наилучшее прогнозирование лечения пациентов [143].

Используемые в настоящий момент протоколы с применением элайнеров мало изучены и не учитывают влияния биотипа слизистой полости рта на конечный результат.

Была изучена обширная литература, однако не удалось найти исчерпывающих сведений об определении биотипа слизистой оболочки полости рта цифровым методом, а также корреляции биотипа слизистой оболочки полости рта и типа обрезки элайнеров.

Важным моментом, влияющим на эффективность ортодонтического лечения, является использование разных подходов к обрезке элайнеров [175]. Однако производители элайнеров предлагают только один из типов обрезки, не учитывая индивидуальных особенностей слизистой оболочки пациента. Можно сделать вывод, что разработка и применение цифрового метода диагностики и планирования лечения также является актуальной задачей.

Таким образом, исследование посвящено одному из наиболее актуальных вопросов ортодонтии – разработке современных цифровых методов ортодонтического лечения. Целью является индивидуализация ортодонтического лечения, что улучшает качество оказываемой помощи, сокращает сроки, а также повышает комплаентность и мотивацию пациентов. Это обуславливает актуальность диссертационного исследования.

**Цель исследования:** повышение эффективности комплексного лечения ортодонтических пациентов на элайнерах.

**Задачи исследования:**

1. Получить трехмерные модели и проанализировать результаты сканирования органов полости рта ортодонтических пациентов.
2. Обработать стек полученных данных КТ ортодонтических пациентов при помощи четырех различных методов и выбрать наиболее подходящий для работы, используя дополнительные входные данные.
3. Сравнить методы определения биотипа цифровым и традиционными методами при отсутствии воспалительных процессов слизистой оболочки полости рта, создать алгоритм получения цифровой карты слизистой оболочки полости рта.
4. Провести сравнительный анализ существующих стандартных методик изготовления ортодонтических элайнеров и изучить деформации элайнеров при помощи системы автоматизированного проектирования.
5. Проанализировать и обосновать особенности применения элайнеров с двумя различными типами обрезки и модифицированной топологией эстетической компоненты в области отсутствующих зубов.
6. Создать виртуальные модели элайнеров. Обучить модель нейросети U-Net по результатам аннотированных образцов КТ. Разработать и определить эффективность протокола ортодонтического лечения на элайнерах исходя из биотипа слизистой полости рта.

**Научная новизна**

Впервые установлена корреляции между биотипом слизистой полости рта и типами применяемых элайнеров.

Впервые применён метод анализа конечными элементами для расчетов эффективности распределения нагрузок и деформаций в конструкции элайнеров.

Впервые обоснована индивидуализация обрезки элайнеров при различных биотипах слизистой полости рта.

Впервые составлен алгоритм получения цифровой карты слизистой оболочки полости рта.

### **Практическая значимость**

Большое практическое значение для ортодонтотв будут иметь новые знания в определении биотипа слизистой оболочки полости рта цифровым неинвазивным методом, а также новые знания по оптимальному изготовлению ортодонтических элайнеров.

Полученная объемная визуализация данных для всех областей органов полости рта, даёт ортодонтам возможность индивидуализировать форму изготавливаемых ортодонтических элайнеров, тем самым сокращается продолжительность лечения пациентов и уменьшается риск возникновения рецессий десны.

Использование методик дополнительного цифрового обследования позволило создать новые протоколы лечения.

### **Личный вклад автора**

Автором лично проведен анализ отечественной и зарубежной литературы по теме диссертации, все результаты, представленные в работе, являются вкладом автора в процесс индивидуализации ортодонтического лечения на элайнерах. Автором были накоплены клинические данные пациентов, составлены и применены новые алгоритмы эффективного лечения ортодонтических пациентов. Автором проведено обучение нейросетей, и результаты их обучения применены в обработке данных КЛКТ, разработаны алгоритмы получения цифровой визуализации слизистой оболочки полости рта, проведена интерпретация



полученных данных, разработаны математические модели физических виртуальных элайнеров, проведена интерпретация виртуальных данных конечных элементов. Автором также составлены алгоритмы оптимизации топологии элайнеров. Проведено моделирование, печать и изготовление модифицированных элайнеров. Клиническая апробация усовершенствованных элайнеров проведена успешно

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ: в журналах, индексируемых в ВАК и РИНЦ – 3, в сборниках – 3, в материалах научно-практической конференции – 9.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация представлена в 3 главах, изложена на 235 страницах, иллюстрирована 152 рисунками. Список литературы включает 328 источников, из них 25 отечественных и 303 зарубежных.

### **Апробация результатов диссертации и внедрение в практику**

Результаты исследования используются в учебном процессе и практической деятельности кафедры стоматологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», а также стоматологической клиники ООО «Тридент».

### **Основные научные результаты**

#### **Публикации**

1. Deep negative volume segmentation [51] страницы 1-11 – *Описан метод использования искусственного интеллекта в ортодонтической практике с применением входных данных, полученных ручным способом для обучения нейросети. Представлены методики получения входных данных –*

*сегментированные костные структуры лицевого скелета и объем височно-нижнечелюстного сустава ручным способом. Авторский вклад 30%.*

2. Методика оценки положения височно-нижнечелюстного сустава [20] страницы 90-98 – *Системная работа по сегментированию костных структур лицевого скелета и применению полученных трехмерных моделей в ортодонтической практике. Описаны методики совмещения трехмерных моделей сегментированных костных структур с отсканированными интраоральным сканером зубных рядов для получения точного положения нижней челюсти и мышц в центральной окклюзии. Авторский вклад 100%*

3. Непрямой метод фиксации брекет-системы с использованием нового отечественного адгезива [6] страница 52 – *апробация и поиск корреляционной модели слизистой полости рта с использованием Колор-Тест №1. Авторский вклад 20%.*

**Перечень конференций, конгрессов и симпозиумов, в которых автор принял участие:**

11 апр. 2019, II международная научно-практическая конференция «Современная детская стоматология и ортодонтия» - Кафедра стоматологии детского возраста и ортодонтии ФГБОУ ВО ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, ISBN (печатное издание) 978-5-93339-436-5 – *представлены методы физико-математического расчета топологии элайнеров при помощи анализа конечными элементами с указанием слабых мест для повышения эффективности ортодонтического лечения.*

17 сен. 2019, Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию основания стоматологического факультета ПСПбГМУ им. Акад. И.П. Павлова - Санкт-Петербург – *представлены современные методы диагностики Европейского сообщества ортодонтов.*

30 окт. 2019, «Современные методы диагностики, лечения и профилактики стоматологических заболеваний»: Симпозиум «Инновационные цифровые технологии для диагностики, планирования лечения и контроля его результатов в стоматологической практике» в рамках XVI научно-практической конференции «Современные методы диагностики, лечения и профилактики стоматологических заболеваний» - Санкт-Петербург – *описаны особенности использования интраорального сканера в ортодонтии и детской стоматологии с дальнейшим применением в ортодонтическом и ортопедическом лечении сложных пациентов.*

2 окт. 2020, Физико-математический расчет топологии элайнеров на III Международная научно-практической конференции «Современная детская стоматология и ортодонтия» - Санкт-Петербург – *представлены особенности топологии элайнеров при дистализации моляров с применением метода конечных элементов и визуализацией напряжений и деформаций конструкции элайнеров.*

28 окт. 2020, «Стоматология северной столицы»: Симпозиум «Цифровая стоматология» в рамках IV Международной научно-практической конференции «Стоматология северной столицы» - Онлайн, Санкт-Петербург – *описаны современные цифровые технологии сканирования, трехмерного моделирования и печати для достижения наибольшей эффективности ортодонтического лечения.*

14 окт. 2021, «Брекеты-система vs элайнеры. Возможное и невозможное» - тема представлена в сборнике тезисов и на международной конференции «Современная детская стоматология и ортодонтия: Сложный стоматологический пациент» - Зеленогорск – *представлены результаты возможностей конструкций элайнеров и визуализированы причины отклонения от запланированного плана лечения при помощи метода конечными элементами.*

31 мар. 2022, «Двухэтапная методика исследования положения мышечков височно-нижнечелюстного сустава» [16] - тема представлена в сборнике тезисов межвузовской конференции и на межвузовской конференции РУДН «Актуальные

вопросы стоматологии» - Москва – *представлены методы сегментирования костных структур лицевого скелета из данных КТ, а также наложение отсканированных интраоральным сканером зубных рядов для получения комбинированных моделей с целью создания цифрового протокола в ортодонтическом лечении.*

15 апр. 2022, «КЛКТ в ортодонтии. Как получить информацию, которой нет на снимке» - тема представлена в сборнике тезисов и в рамках V международной научно-практической конференции «Современная детская стоматология и ортодонтия» - Санкт-Петербург – *представлены возможности получения и прогнозирования результатов ортодонтического лечения с использованием ручной сегментации костных структур лицевого скелета и трехмерных моделей зубных рядов.*

30 ноя. 2022, XXVII Всероссийская научно-практическая конференция челюстно-лицевых хирургов и стоматологов с международным участием «Новые технологии в стоматологии» - Санкт-Петербург – *представлена инновационная индивидуализация топологии элайнеров с использованием комбинированных трехмерных моделей костных структур, зубных рядов и моделей элайнеров.*

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Объективность ортодонтического лечения достигается путем внедрения новых цифровых технологий в лечебный процесс и обработку полученных данных. Созданы трехмерные модели зубных рядов в центральной окклюзии интраоральным сканером в соответствии с протоколом сканирования, составлены виртуальные планы лечения ортодонтических пациентов на элайнерах.

2. Исследование КТ является четырехмерным набором вокселей с диапазоном плотности по шкале Хаунсфилда от -1000 до 3000. Для просмотра необходимой информации был выделен диапазон, соответствующий плотности

интересующих тканей. Для создания трехмерных моделей костных структур был выделен контур области на каждом из сотен слоев с целью сегментировать диапазон и создать оболочку. Сегментация ручным способом заняла много времени (8-12 часов), ручная островная – 5-8 часов. Сегментация по водоразделам заняла 1-2 часа, однако таким способом сегментировать каждый зуб по отдельности невозможно. Для ускорения рутинного процесса обработки проведено ручное сегментирование, обучена нейронная сеть, в результате создан ИИ, который в свою очередь способен создать точную составную трехмерную модель за 3-5 минут.

Для обеспечения возможности применения сегментации при помощи ИИ выполнено контролируемое обучение нейронной сети. То есть обучена модель нейросети U-Net по результатам аннотированных образцов КТ. Представлена методика использования ИИ для сегментации структур лицевого скелета из данных КТ.

3. При ортодонтическом лечении большую роль играет биотип слизистой полости рта, так как он оказывает существенное влияние на выбор тактики лечения. При использовании прозрачных элайнеров конструкция большой площадью поверхности опирается на слизистую оболочку полости рта, и при активации аппарата создаются дополнительные зоны давления, которые могут привести к рецессии десны. Создана цифровая модель биотипа слизистой оболочки полости рта на основе комбинированной трехмерной модели, включающей в себя сегментированную модель данных КТ и обработанную модель сканов зубных рядов. На комбинированных трехмерных моделях лицевого скелета выполнен анализ глобального распределения толщины слизистой оболочки полости рта.

4. При использовании анализа методом конечных элементов для каждой задачи создается определенный алгоритм – дизайн математической модели. В связи с тем, что ранее задач по деформации конструкций элайнеров и воздействию на

слизистую оболочку полости рта не проводилось, создан новый оригинальный дизайн математического исследования моделей ортодонтических элайнеров.

5. Так как процессы, происходящие во время лечения ортодонтических пациентов, крайне сложны, и увидеть их невозможно, было выполнено математическое моделирование с учетом всех физических параметров элайнеров. Созданы трехмерные модели элайнеров, выполнен анализ топологии элайнеров конечными элементами и интерпретированы полученные результаты.

В большинстве случаев рекомендуется использовать элайнеры с высокой обрезкой. Для минимизации рисков осложнений и объективизации выбора необходимого типа обрезки проведен сравнительный математический анализ конечными элементами деформаций элайнеров с фестончатой и прямой обрезкой.

При создании элайнеров в области отсутствующих или удаленных зубов применяются два стандартных метода – эстетический и функциональный. Для обоснования возможности объединения обоих методов проведен математический анализ конечными элементами ортодонтических конструкций с комбинированными эстетическими компонентами.

6. Цифровой протокол ортодонтического лечения является сложным и трудоемким. Для оптимизации работы врача-ортодонта и его команды разработан протокол лечения по выбранным критериям. Новый протокол позволяет, используя сегментацию при помощи ИИ, составлять индивидуализированный план лечения; опираясь на глобальную цифровую карту слизистой оболочки полости рта, избегать нежелательных осложнений; применять в ортодонтическом лечении элайнеры с улучшенными силовыми и эстетическими составляющими. В конечном счете цифровизация протокола приводит к повышению качества, экономии времени и увеличению комплаентности пациентов в процессе лечения.

## Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 Методы оценки биотипа слизистой

Определение биотипа слизистой полости рта стоматологическим зондом является достаточно травматичной процедурой, поэтому проводится с использованием анестезии [255, 297]. Следующий метод определения биотипа связан с получением дополнительной дозы облучения при проведении отдельного КТ исследования [48]. Данная информация о биотипе слизистой крайне важна при расчете прилагаемых сил, при определении возможности опоры на слизистую полости рта и при прогнозировании исхода лечения.

Цифровизация ортодонтического лечения включает в себя сбор и обработку данных, которые необходимо получить и подготовить к дальнейшей работе. Далее при помощи искусственного интеллекта для создания комплексного автоматического плана лечения и прогноза результатов лечения следует создать алгоритмы обработки и взаимодействия входных данных [75, 98, 130, 143, 147, 214, 242, 244].

В современной стоматологии определение биотипа слизистой полости рта является одной из ключевых тем. Правильное определение биотипа влияет как на план лечения, так и на профилактику осложнений, таких как рецессия десны.

Рецессия десны — это часто встречающееся заболевание десны с различной этиологией, и проявляется смещением вестибулярного края десны в апикальном направлении с дальнейшим обнажением поверхности корня зуба [10, 25].

Биотип десны определяется как толщина слизистой в вестибулярном направлении. Биотип десны играет ключевую роль в прогнозировании успеха и предотвращении осложнений при ортодонтическом лечении [27]. Поэтому необходимо точное планирование, которое дает предсказуемый и стабильный результат [7, 17, 155, 160].

При наличии широкой зоны кератинизированной прикреплённой десны, поддерживается оптимальное состояние пародонта, что в свою очередь препятствует распространению воспалительных процессов. Если зона кератинизированной прикреплённой десны недостаточно широка, то это может привести к развитию деструктивных процессов и возникновению рецессий. Была выявлена определенная корреляция между шириной кератинизированной прикреплённой десны и биотипом пародонта [268].

Большинство авторов и клинических ортодонтотв разделяют биотип десны на два типа: толстый и тонкий.

Для тонкого биотипа десны характерны высокие межзубные сосочки с точечными проксимальными контактами.

Средняя толщина прикреплённой десны составляет 1 мм.

Для толстого биотипа характерны более сглаженные десневые контуры, межзубные сосочки короткие и широкие, а средняя толщина составляет 1,5-2 мм [328].

Однако ряд авторов считает, что существует переходной биотип десны – средний [241, 263]. Данные авторы характеризуют его как переходной между толстым и тонким биотипом десны со средним значением 1,5 мм. Maria N. и соавторы провели исследования, в которых доказали невозможность отнести слизистую оболочку полости рта к какому-то определенному типу, и ввели определение смешанного типа, который включает в себя комбинацию сразу нескольких фенотипов [107]. Наибольшую сложность в планировании лечения и получении стабильного эстетического и функционального результата представляет тонкий биотип десны из-за небольшого содержания коллагена и меньшей кератинизированной прикреплённой зоной, чем при толстом фенотипе [27, 151]. По данным авторов, истинно-тонкий биотип десны встречается у двух третей пациентов [250].



В современной стоматологии успешно используется множество методов оценки биотипа десны:

- гистологические методы,
- визуальная оценка и зондирование (инвазивное и неинвазивное),
- ультразвуковой,
- рентгенологические,
- данные компьютерной томографии [1, 13, 35].

Fischer К. и соавторы установили, что при помощи сканирующей компьютерной томографии существует возможность классифицировать биотип пародонта, и это имеет клиническое применение [105].

Barriviera M. и соавторы предложили делать измерения при помощи КТ в определенных точках на верхней челюсти от клыков до вторых моляров на расстоянии 2, 5, 8 и 12 мм. Данный неинвазивный метод дает представление о распределении толщины слизистой на верхней челюсти, однако имеет ряд недостатков, которые не позволяют создать непрерывное распределение измерений. Для получения такого рода данных при помощи КТ авторы использовали пластиковые ретракторы и деревянный шпатель для изоляции слизистой неба от языка и щек [48].

Wilmes В. предложил использовать стоматологический зонд с силиконовым стопором для инвазивного определения толщины слизистой на верхней челюсти перед установкой микроимплантов, необходимых для фиксации ортодонтической конструкции [297]. Данный метод является локально-точечным и травмирующим, а также обладает рядом недостатков при переносе измерений с зонда со стопором.

Кератинизированная десна альвеолярной части состоит из двух частей - свободной и прикрепленной. Свободная десна расположена выше десневого желобка и не сращена с зубом. Прикрепленная десна сращена с цементом корня

зуба и надкостницей. Она начинается от нижней границы десневой борозды и продолжается до зубоальвеолярного соединения.

В клинической практике прикрепленная десна оценивается по цвету, текстуре, форме, десневым контурам и биотипу [23].

Гистологическое строение биотипов десны с толстым и тонким биотипом отличается, что, в свою очередь, влияет на планирование ортодонтического лечения и учет вероятности осложнений. Тонкому биотипу присущи капилляры и артериолы с узким и умеренным просветом, малая выраженность шиповатых и зернистых клеток. Толстому биотипу характерны широкий просвет сосудов, выраженные слои шиповатых и зернистых клеток [18].

Основным параметром биотипа десны, помимо толщины и высоты десневых сосочков, является толщина прикрепленной десны. По данным различных авторов отличается характеристика толстого и тонкого биотипа. Тонкий биотип характеризуется десной, толщина которой составляет менее 1 мм, а толстый - более 1 мм [216].

Тонкий биотип до 1,5 мм, толстый – более 2 мм [255].

В клинической практике особое внимание уделяется тонкому биотипу десны. При ортодонтическом лечении у пациентов с толстым биотипом слизистой может развиваться локальная форма пародонтита, в случае с тонким биотипом вероятность развития рецессий намного выше, поскольку потеря зубодесневого прикрепления ведет к маргинальному воспалению и резорбции стенки альвеолы [24].

В клинической практике используются различные методы определения толщины десны, однако все они имеют ряд недостатков и ограничений.

Одним из экспресс методов, предложенных Смирновой С. С., является модификация клинического способа измерения толщины десны при помощи

тонкого зонда или эндодонтического инструмента, например, риммером номер 20 с надетым силиконовым стоппером. После инфльтрационной анестезии десна прокалывалась до упора инструмента в костную ткань, а толщина фиксировалась силиконовым стоппером. Далее проводилась фотофиксация на миллиметровой бумаге, и осуществлялись измерения толщины десны [19]. Схожую методику предложил Wilmes B. [297].

Амхадовой М.А. был предложен инвазивный метод определения толщины прикрепленных мягких тканей с использованием эндодонтического файла (ISO 0,10) с силиконовым стоппером и применением аппликационной анестезии 10% спрея лидокаина. Измерения толщины костной ткани проводились в трех точках: в области предполагаемого центра установки имплантата, а также вестибулярно и орально на прикрепленной кератинизированной слизистой, отступив от первого прокола на 3 мм. Расстояние от кончика файла до силиконового стоппера измерялось при помощи эндодонтической линейки. Биотип считали тонким при величине 1 мм и меньше.

Еще одним клиническим методом определения толщины десны является прокол в пределах прикрепленной десны на 1-2 мм апикальнее дна десневой борозды [18].

Малоинвазивный метод определения биотипа, который часто используется врачами всех специальностей и не требует подготовки, заключается в оценке степени просвечиваемости пародонтального зонда через десну. При толстом биотипе зонд не будет просвечиваться, при тонком, будут видны нечеткие контуры [162]. При таком методе оценки не учитывается переходной тип десны, и нет возможности провести количественные измерения.

При помощи специально разработанного ряда зондов для определения биотипа Nu-Friedy COLORVUE BIOTYPE PROBE изготовленного из белого пластика с цветовой маркировкой, Rasperini G. классифицировал биотип десны на

четыре типа: тонкий, средний, толстый и очень толстый. Суть метода заключается в оценке просвечиваемости зонда через прикрепленную десну. Набор зондов состоит из белого (без окраса кончика зонда), а также с зеленым и синим окрасом. Если просвечивается зонд без окраса (белый), то биотип считается тонким. Если просвечивается зеленый, то биотип средний. Если виден синий, биотип толстый. Если ни один из зондов не просвечивается, биотип классифицируется как очень толстый [240].

Еще один способ определения толщины слизистой заключается в использовании ультразвукового измерительного прибора SDM (Austenal Medizintechnik, Кельн, Германия). Для измерения толщины слизистой используется прибор с контактной поверхностью размером 4 мм. Поверхность прибора увлажняется водой или ротовой жидкостью и прикладывается к месту измерения на 23 секунды. Диапазон измерений составляет от 0,5 до 6,0 мм. Погрешность измерений на шкале прибора составляет 0,1 мм [259].

Таким образом, во всех приведенных выше методах присутствуют прогрессивные моменты в подходе к систематизации изучения биотипа десны и слизистой полости рта. Однако они требуют изменений в протоколах КТ исследований. А использование деревянных шпателей, ретракторов и меток затрудняет получение необходимых универсальных данных, которые будут использоваться не только для изучения биотипа десны, но и для планирования ортодонтического лечения в целом. Некоторые методы являются болезненными и травмирующими слизистую и не обладают достаточной визуализацией распределения толщины мягких тканей.

Во всех случаях, указанных выше, использовался только один метод— зондирование или исследование КТ. Однако нигде не было совмещено два или более независимых метода для получения большего количества данных и систематизации распределений. В большинстве исследований измерения

проводились только на верхней челюсти, и результаты, полученные по ней, интерполировались и на ткани нижней челюсти.

## **1.2 Терапия Прозрачных Элайнеров. Анализ конечными элементами**

Элайнеры – это съемный ортодонтический аппарат, изготовленный из прозрачного пластика путем термоформирования. Термин Терапия Прозрачных Элайнеров (ТПЭ) включает в себя большой спектр съемных аппаратов с различными режимами ношения, методами их производства и конструирования, подходами к применению и использованию в различных клинических ситуациях. Прозрачные элайнеры покрывают поверхности зубов полностью или частично, чем отличаются от традиционных ортодонтических аппаратов и систем. Таким образом, элайнеры по своим конструктивным особенностям, обладают способностью лечить большое количество ортодонтических аномалий [295]. Изначально система ТПЭ предназначалась для исправления небольших аномалий положения зубов. Поэтому и по сей день некоторые клиницисты продолжают придерживаться данной концепции и используют элайнеры исключительно для доведения ортодонтического лечения до идеальной окклюзии на завершающих этапах лечения [54, 64, 91, 295]. При этом все больше клиницистов применяют дополнительные ретенционные элементы - так называемые аттачменты, состоящие из композитного материала и фиксирующиеся на зубах через специальную матрицу из мягкого тонкого пластика по четкому протоколу [42, 95, 294].

Добиться успеха в современной цифровой стоматологии в большинстве своем можно путем прогнозирования, точных расчетов и цифровых методов обследования. Не смотря на широкий выбор ортодонтической аппаратуры, сегодня большинство пациентов предпочитают удобные и эстетичные элайнеры [197, 226].

Формы и размеры аттачментов прописываются исследователями. В настоящее время созданы протоколы для каждого типа передвижения зубов, а

также под каждую конкретную задачу. Сегодня протоколы для аттачментов постоянно подвергаются изменениям [42, 126, 272]. Изначально дизайн аттачментов был простой, но с тех пор, когда стали использовать анализ методом конечных элементов (FEA), все больше типов, форм и размеров аттачментов стали внедряться в протоколы лечения [164].

Элайнеры по типу производства можно разделить на два типа:

- 1) Элайнеры, полученные путем термоформирования,
- 2) Элайнеры, полученные прямой печатью на 3D-принтере [158].

Показатель пластичности материала 3DPIN (29,4%), используемого при прямой печати, говорит о хрупкости материала. Он оказался намного ниже, чем у Invisalign (40,0–40,8%) и обычных термоформованных капп (34,0–35,9%) (20–22), демонстрирующих более пластичное поведение. При этом индекс релаксации материала для прямой печати оказался намного выше, по сравнению с термоформировочными материалами Invisalign, что является причиной быстрого затухания ортодонтических сил [62]. Помимо худших физических свойств, по сравнению с термоформировочным материалом, наблюдаются большие погрешности в толщине элайнеров. Это обусловлено самим процессом изготовления прозрачных элайнеров непосредственно с помощью 3D-печати. В процессе печати элайнеров на 3D-принтере невозможно гарантировать стабильную толщину элайнеров, что может отрицательно сказаться на их клинической применимости [93].

По мнению исследователей, технология 3D-печати является подходящим способом изготовления прозрачных выравнивателей и предоставляет ряд преимуществ по сравнению с обычным процессом термоформования. В опубликованной в настоящий момент литературе о прозрачных элайнерах с прямой печатью показано, что такой процесс технически возможен. Однако материала, идеально подходящего для этих целей, еще не существует. Необходимо

разработать программное обеспечение, адаптированное для этой цели. По этой причине не было проведено никаких клинических исследований с использованием печатных элайнеров. Исходя из этого, необходимы дальнейшие исследования *in vitro* и *in vivo* для тестирования этих новых технологий и материалов. Особое внимание следует уделить цитотоксичности смол, пригодных для печати. Необходимо также провести расчеты клинических характеристик прозрачных элайнеров, напечатанных прямым способом, чтобы сравнить с данными, полученными для термоформованных элайнеров [277]. Непосредственная печать прозрачных элайнеров открывает широкие перспективы для создания модифицированных топологий конструкций элайнеров и возможность печати как функциональных, так и эстетичных элайнеров без ущерба для того или другого. Это станет возможным в будущем при создании подходящего материала, обладающего полной биосовместимостью и отсутствием цитотоксичности [103].

Прозрачные элайнеры на сегодняшний день являются самой технологичной и прогрессивной частью ортодонтии, но, к сожалению, наименее изученной. Биомеханика прозрачных элайнеров опирается на биологические процессы организма, однако принципы работы с элайнерами отличаются от традиционной техники работы на брекет системах. В лечении пациентов на прозрачных элайнерах используется виртуальное планирование, которое позволяет клиницисту в программе определить последовательность перемещения зубов, ведущую к окончательной окклюзии до того, как будет перемещен хотя бы один зуб. Это требует смены парадигмы в мышлении клинициста, который теперь должен «начать с конца». Каждый вариант лечения может быть визуализирован с точки зрения продолжительности лечения, степени сложности перемещения зубов и результатов лечения.

Клиницист вместе с пациентом могут затем выбрать вариант лечения, который лучше всего соответствует поставленным целям [138, 272].

Важно знать и понимать принципы действия брекет систем, порядок смены дуг, механику действия дополнительных элементов, но не менее важно знание и понимание принципов индивидуализации прозрачных элайнеров. Для того чтобы лечение на элайнерах было успешным, требуется индивидуальный подход. Клиницист должен использовать все возможности модификации элайнеров путем добавления структурных элементов во время клинического приема [56–58].

В процессе создания ретенционного элемента по типу кнопки или выреза при помощи термоформировочного инструмента в самом элайнере в месте крепления эластиков происходят структурные изменения. Такие деформации приводят к неправильному распределению нагрузки, что в свою очередь замедляет перемещение зубов и нагружает слизистую оболочку полости рта. Эти негативные эффекты можно устранить путем добавления дополнительных усиливающих конструкции элементов.

Математический расчет дает возможность визуализировать количественные нагрузки, которые необходимы для оптимального передвижения зубов с наименьшими временными затратами.

Решение состоит из множества небольших взаимосвязанных задач, так называемых конечных элементов, и является только приближенным, так как общая комплексная задача слишком сложна для расчета. Конечный элемент точен в моделировании и адаптируется к топологии исследуемой модели, что является эффективным методом инженерного анализа. На сегодняшний день данный метод получил широкое применение в медицине и успешно используется при расчетах индивидуальных конструкций элайнеров [111].

Используя математическую модель, полученную в результате дискретизации твердых тел в САПР в трех измерениях, модели конечных элементов способствуют пониманию биомеханики ортодонтических устройств, поскольку они позволяют оценивать напряжения, возникающие во время лечения в различных тканевых



структурах, таких как альвеолярная кость, периодонтальная связка и зубы. Аналогичным образом с помощью моделей КЭ можно определить схемы нагрузки и смещения в зависимости от используемого устройства [68, 134, 159, 205].

Корпусное перемещение зубов в ортодонтии широко изучалось и признано чрезвычайно сложным, поскольку подразумевает, что приложенная сила должна проходить через центр сопротивления зуба. Следовательно, для корпусного перемещения зуба требуется сложная система сил и моментов сил, которые должны быть приложены к зубу [176].

Методы ортодонтического перемещения на основе термоформованных пластиковых элайнеров продемонстрировали ограничения в конфигурации сложных силовых систем, таких как экструзия центральных резцов, вращение и наклон клыков, а также корпусное перемещение зубов [174]. Необходимость преодолеть эти ограничения привела к разработке биомеханически «улучшающих» композитных аттачментов, приклеиваемых к поверхности зуба. Эти дополнения увеличивают биомеханические возможности элайнеров, позволяя создавать более сложные силовые системы, обычно включающие пары сил. Необходимо понимать биомеханическую природу этих инновационных инструментов, чтобы поддерживать протоколы их использования, основанные на надежных доказательствах. Модели FEA, применяемые к новым ортодонтическим методикам на основе элайнеров, позволяют лучше понять их теоретическую эффективность, что позволяет улучшить понимание в клинических условиях.

Для полного понимания как работают аппараты, созданные термоформировочным путем, необходимо знать два фундаментальных отличия:

- При традиционном ортодонтическом перемещении зубов, к брекету прикладывается сила, которая передает ее структурам зуба, создавая механико-биологическую цепь событий, которая приводит к смещению зуба.

- При перемещении зубов с помощью элайнеров, преднамеренное, заранее заданное «несоответствие» между элайнерами и зубами задается на каждом этапе лечения с использованием виртуальной модели. Элайнер, соответствующий новому положению зуба, устанавливается на зубную дугу, создавая при каждом несоответствии систему сил, которая непосредственно передается на зуб, образуя аналогичную цепь событий, приводящую к новому положению зубов [123].

Следует отметить, что лучшее понимание свойств материала приводит к наиболее точному определению последовательности движения зубов и, как следствие, к более эффективному лечению. Было показано, что существует большое разнообразие систем механизмов начального усилия во время лечения прозрачными элайнерами. Поскольку за элайнером с высоким начальным усилием может следовать элайнер с низким усилием, это приводит к непостоянному передвижению зубов. Кроме того, по мере того как порядок последовательности элайнеров увеличивается, деформации элайнеров, связанные с передачей усилия, возрастают. Существуют исследования, показывающие, что ортодонтическая сила, создаваемая термопластичным материалом, тесно коррелирует с его твердостью и модулем упругости; следовательно, различия в физико-химических свойствах прозрачных элайнеров влияют на то, какую систему элайнеров выберет практикующий врач.

Физико-химические свойства материала элайнеров оказывают непосредственное влияние на результат лечения. Пациенты, носившие элайнеры из более твердого материала в течение двух недель активации, продемонстрировали наилучшие результаты по всем параметрам выравнивания положения зубов и окклюзии в целом [33, 94].

Важно определить, изменяются ли свойства материала после использования, поскольку модификация биопленки и условия окружающей среды в полости рта могут влиять на твердость и вязкоупругость материала. Поскольку элайнеры во

время ношения подвергаются воздействию ферментов слюны, иных побочных продуктов ротовой флоры, а также воздействию различных жидкостей, плюс существует возможность их повреждений, вызванных глотанием, речью и бруксизмом [45, 65, 66, 230, 235]. Производство прозрачных элайнеров основано на применении прозрачных термопластичных материалов, обладающих подходящими физическими, химическими и механическими свойствами [82, 318].

Механические свойства полимеров играют решающую роль в эффективности терапевтического лечения. Низкая жесткость, хорошая деформируемость, стабильность размеров, а также высокая биосовместимость — вот условия, которым должны соответствовать используемые полимеры. Ортодонтическая сила возникает из-за деформации элайнеров и благодаря их эластичности. Поэтому ортодонтическая сила напрямую зависит от химического состава материала элайнеров, расположения и направленности полимерных цепей в нем, толщины конструкции элайнера, а также от клинического протокола, в котором закладывается количество перемещения зубов [112, 127, 129, 148, 165, 171, 188, 190, 191, 253, 265]. Идеальный материал для элайнеров должен быть прозрачным, создавать достаточную механическую силу, чтобы вызывать ортодонтическое перемещение зубов, при этом строго контролируемым образом, и одновременно он не должен повреждать окружающие ткани пародонта [112].

Полиэтилентерефталатгликоль (Petg), Поликарбонат (PC) и Термопластичный полиуретан (TPU) используются в основном для модификации свойств элайнеров [82, 129, 188, 193]. PETG - некристаллический аморфный сополимер полиэтилентерефталата (PET), обладает хорошими механическими свойствами, высокой износостойкостью, стабильностью размеров и устойчивостью к растворителям [29, 52, 82, 92, 116, 148, 188, 318].

Гликолевая группа (G) добавляется к основной цепи сополимеризующего агента, который представляет собой состав, состоящий из 31% моль 1,4-

циклогексилендиметилтерефталата (PCT) и 69 мол. % PEG. PETG имеет почти ту же температуру стеклования ( $T_g$ ), деформационное поведение и оптические свойства, что и PET, но не проявляет поведения PET при кристаллизации, вызванной деформацией, при температуре производства [26, 138, 193, 235].

Поликарбонат (PC) обладает превосходной механической прочностью, низким водопоглощением и прозрачностью, что делает этот материал очень подходящим для ортодонтического применения. Его свойства очень близки к свойствам полиметилметакрилата (PMMA), но поликарбонат обладает более высокой механической прочностью и может использоваться в более широком диапазоне температур [318]. Поликарбонат также обладает высокой прозрачностью в спектре видимого света и обеспечивает более высокую светопропускаемость, чем многие виды стекол [129].

Полиуретан (PU) - это еще один эластичный полимер, устойчивый к истиранию и воздействию масла. Его свойства сильно зависят от сырья, используемого в производстве [55, 154, 177, 201, 202, 223, 252, 260].

Термопластичный полиуретан (TPU) - один из самых универсальных инженерных термопластов со свойствами эластомера. ТПУ обладают превосходными физическими свойствами, химической стойкостью, стойкостью к истиранию, адгезионными свойствами и простотой обработки [108, 194].

На механические свойства стоматологических полимеров влияют множество факторов, таких как структурные факторы (молекулярные и кристаллические структуры и т.д.) и факторы окружающей среды (температура, влажность и т.д.). Используемые полимеры обычно являются либо аморфными, либо полукристаллическими. Аморфные полимеры обычно кажутся прозрачными, потому что через них может проходить видимый свет, в то время как многие полукристаллические и кристаллические полимеры непрозрачны, потому что они состоят из смеси кристаллической и аморфной фаз с различными показателями

преломления. Кристаллическая фаза в полукристаллических полимерах может служить в качестве армирующей сетки, способствующей улучшению механических свойств в широком диапазоне применений. Низкая кристалличность полимеров обычно означает высокую гибкость, высокую эластичность, хорошую адаптацию к морфологии зуба. С другой стороны, полимеры обладают низкой прочностью на разрыв, низкой химической стойкостью и стабильностью [82]. С клинической точки зрения, полимеры с высокой гибкостью и эластичностью более удобны для пациентов при установке или удалении элайнеров. Кроме того, они лучше адаптируются к сложности морфологии зуба, идеально прилипают к любой поверхности. По сравнению с элайнерами из жестких материалов они также обеспечивают непрерывность воспроизводства силы во время ортодонтического лечения.

В таблице 1 приведены восемь термопластичных материалов, используемых в производстве элайнеров.

Таблица 1 - Материалы, используемые при производстве элайнеров

Eva	сополимер этилена и винилацетата
PE	полиэтилен
PETG	полиэтилентерефталат гликоль
PP	полипропилен
PC	поликарбонат
A+	сополиэфир
C+	сополимер полипропилена и этилена
PUR	полиуретан из метилendifенилдиизоцианата и 1,6 гександиола, добавка

Предел текучести при растяжении исследуемых полимеров можно распределить следующим образом:  $PC \geq PUR > PETG \geq A+ > PP \geq C+ > PE \geq EVA$ . Это можно трактовать наличием степени кристалличности соответствующих полимеров. PC, PETG, A +, PUR как аморфные полимеры демонстрируют более высокий предел текучести при растяжении, чем PP, C+, PE и EVA, которые являются полукристаллическими.

Помимо структурного влияния на механические свойства, важную роль играет также температура стеклования ( $T_g$ ). Ниже  $T_g$  у аморфных и полукристаллических полимеров, которые ведут себя очень похоже. Их механическое поведение обычно жесткое и стеклянное. Выше  $T_g$ , поведение аморфных и полукристаллических полимеров частично меняется. Аморфные полимеры размягчаются и могут становиться гибкими эластомерами или даже вязкой жидкостью. Полукристаллические полимеры также размягчаются и могут стать гибкими в зависимости от степени кристалличности [253]. Как правило, кристаллическая фаза полукристаллического полимера, значительно превышающая  $T_g$ , также может исчезнуть из-за плавления.

Это означает, что механические свойства полимеров с  $T_g$  при комнатной температуре могут сильно зависеть от изменений температуры. Другим фактором, влияющим на свойства полимеров, является молекулярная ориентация полимерных цепей.

Таким образом, механические свойства полимеров зависят от множества факторов, начиная с фазового состояния полимеров (кристаллического или аморфного), их водопоглощающей способности, их молекулярной ориентации и последовательности их обработки, а также от условий их применения [28, 55].

Высокий модуль упругости предпочтителен для элайнеров, так как он увеличивает способность элайнеров передавать силу при постоянном напряжении.

Кроме того, материалы с более высоким модулем упругости могут обеспечивать те же силы при меньших размерах [31].

Процесс термоформования влияет на механические свойства прозрачных элайнеров [31, 61, 253].

После термоформования обнаружено снижение предела текучести и модуля упругости исследованных полимеров. Авторы объясняют такое поведение уменьшением молекулярной массы из-за термообработки, ориентации молекул и быстрого охлаждения, препятствующего дальнейшей кристаллизации полимеров и вызывающего остаточные напряжения.

Ryu J. и соавторы исследовали влияние термоформования на физические и механические свойства материалов для прозрачных капп. Они заметили, что оптическая прозрачность, сила растяжения и модуль упругости материалов для выравнивания уменьшаются после процесса термоформования, в то время как водопоглощение увеличивается. Материалы, подвергнутые воздействию температуры, которая выше их соответствующей  $T_g$ , могут легко деформироваться и уменьшаться в толщине. Кристалличность термопластичных материалов изменяется после термоформования, что приводит к изменению механических свойств.

Таким образом, эти авторы пришли к выводу, что свойства материалов, такие как прозрачность, водопоглощение и растворимость, поверхностная твердость, изгиб и модули упругости, а также силы растяжения и изгиба, могут значительно измениться после термоформования [128, 254].

Хотя полиуретан биосовместим, он не является инертным материалом, так как чувствителен к теплу, влажности и ферментам слюны, никаких побочных продуктов после хранения капп Invisalign в искусственной слюне или этанольном растворе для старения обнаружено не было. Кроме того, не было обнаружено признаков цитотоксичности или эстрогенности при различных концентрациях

элюентов элайнеров. Это может быть связано со структурой материала, поскольку он состоит из полиуретана с добавлением метилendifенилдиизоцианата и 1,6-гександиола. Дифенильная структура обеспечивает стабильность и достаточную реакционную способность для образования полимера без побочных продуктов. Кроме того, в отличие от ароматических колец в бис-ГМА, полиуретан имеет короткие жесткие части, соединенные короткими гибкими шарнирами, и длинные гибкие части. Однако условия испытаний *in vitro* могли занижать химическую стабильность материала.

Таким образом, был проведен доскональный анализ литературы, изучен дизайн математических моделей, имеющих в исследованиях других авторов, в которых учитывались большинство анатомических структур и элементов (разность плотности кости - компактная пластинка и пористая костная ткань, пародонтальные связки и однородность строения зубов - без разделения эмаль-дентин-цемент). Тем не менее, приходится констатировать, что предложенные варианты не подошли к поставленным в данной работе целям и задачам [84, 123].

### **1.3 Значение биотипа СОПР при ортодонтическом лечении**

Одним из основных направлений современной стоматологии является определение биотипа слизистой оболочки полости рта (СОПР). Это важно для разработки эффективного плана лечения и сведения к минимуму потенциальных осложнений, таких как рецессия десны.

Рецессия десны — это часто встречающееся заболевание десны с различной этиологией, и проявляется смещением вестибулярного края десны в апикальном направлении с дальнейшим обнажением поверхности корня зуба.

Биотип десны определяется, как толщина слизистой в вестибулярном направлении. Биотип десны играет ключевую роль в прогнозировании успеха и



предотвращении осложнений при ортодонтическом лечении [27]. Поэтому необходимо точное планирование, которое дает предсказуемый и стабильный результат [7, 17, 155, 160]. При наличии широкой зоны кератинизированной прикреплённой десны поддерживается оптимальное состояние пародонта, что препятствует распространению воспалительных процессов. Если зона кератинизированной прикреплённой десны недостаточно широка, то это может привести к развитию деструктивных процессов и возникновению рецессий. Была выявлена определенная корреляция между шириной кератинизированной прикреплённой десны и биотипом пародонта [268].

Большинство авторов и клинических ортодонтотв разделяют биотип десны на два типа: толстый и тонкий.

Для тонкого биотипа десны характерны высокие межзубные сосочки с точечными проксимальными контактами.

Средняя толщина прикреплённой десны составляет 1 мм.

Для толстого биотипа характерны более сглаженные десневые контуры, межзубные сосочки короткие и широкие, а средняя толщина составляет 1,5-2 мм [328].

Однако ряд авторов считает, что существует переходной биотип десны – средний [241, 263]. Данные авторы характеризуют его как переходной между толстым и тонким биотипом десны со средним значением 1,5 мм. Maria N. и соавторы провели исследования, в которых доказали невозможность отнести слизистую оболочку полости рта исключительно к какому-то одному определенному типу и ввели определение смешанного типа, который включает в себя комбинацию сразу нескольких фенотипов [107]. Наибольшую сложность в планировании лечения и получении стабильного эстетического и функционального результата представляет тонкий биотип десны из-за небольшого содержания коллагена и меньшей кератинизированной прикреплённой зоной, чем при толстом

фенотипе [27, 151]. По данным авторов, истинно-тонкий биотип десны встречается у двух третей пациентов [250].

Наряду со стандартными методами определения биотипа СОПР для всей полости рта ряд авторов заметили, что разница толщины слизистой на верхней и нижней челюстях отличаются. После проведения измерений была выявлена существенная разница между толщиной слизистой на верхней и нижней челюсти [38, 86, 199, 215, 251, 289].

Гистологическое строение биотипов десны с толстым и тонким биотипом отличается, что в свою очередь влияет на планирование ортодонтического лечения и учет вероятности осложнений. Данный вопрос является одним из самых обсуждаемых и исследуемых в области пародонтологии и затрагивает все области стоматологии. Методы исследования биотипа десны также отличаются у каждого автора в соответствии с его особенностями работы и возможностями наименее инвазивного и более эффективного и доказуемого способа определить необходимые корреляции осложнений и толщины десны. В зависимости от необходимости различные авторы используют классификации биотипа десны в соответствии с проводимыми процедурами или из личных предпочтений [21, 50, 106, 109, 157, 161, 172, 207, 209, 262].

В клинической практике особое внимание уделяется тонкому биотипу десны, так как при ортодонтическом лечении у пациентов с толстым биотипом слизистой может развиваться локальная форма пародонтита, а в случае с тонким биотипом, вероятность развития рецессий намного выше, поскольку потеря зубодесневого прикрепления ведет к маргинальному воспалению и резорбции стенки альвеолы.

«Колор-тест №1», в состав которого входит йод, йодистый калий и основа, применяется для оценки степени воспаления СОПР - проба Шиллера-Писарева. При воспалении слизистой оболочки полости рта количество гликогена

увеличивается. Проба Шиллера—Писарева основана на способности гликогена давать окраску при взаимодействии с йодсодержащими растворами.

Для характеристики воспаления использовали специально разработанную градацию по цветовой маркировке: проба отрицательная, если десна окрашивается в светло-желтый цвет; слабоположительная — при окрашивании в светло-коричневый цвет; положительная — при окрашивании в темно-бурый цвет.

Для оценки глубины воспалительного процесса в слизистой оболочке полости рта применяется проба Шиллера—Писарева. При этом используется йод-йодидно-калиевый раствор, который окрашивает участки скопления гликогена, содержащегося в большом количестве в воспаленных тканях. Интенсивность окрашивания и ее площадь уменьшаются по мере стихания воспалительного процесса.

Для оценки состояния десен пациента используется йодная проба. При этом десна смазывается раствором “Колор-Тест №1”, и оценивается степень окраски. Участки интенсивного потемнения десны фиксируются в карте обследования.

Для объективизации результатов йодной пробы используется шкала баллов:

Окраска десневых сосочков – 2 балла;

Окраска десневого края – 4 балла;

Окраска альвеолярной десны – 8 баллов.

Йодное число рассчитывается как сумма баллов у каждого зуба, разделенная на число обследованных зубов [278]. Оценка значений йодного числа Свракова приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Цифровое значение пробы Шиллера-Писарева

<p><b>Слабо выраженный процесс воспаления</b> - это состояние, при котором индекс РМА составляет менее 2,3 баллов. При этом воспаление десен может быть незначительным или отсутствовать вовсе.</p>
<p><b>Умеренно выраженный процесс воспаления</b> - это состояние, при котором индекс РМА составляет от 2,3 до 5,0 баллов. При этом воспаление десен может быть умеренным или выраженным.</p>
<p><b>Интенсивный воспалительный процесс</b> - это состояние, при котором индекс РМА составляет от 5,1 до 8,0 баллов. При этом воспаление десен может быть тяжелым или очень тяжелым</p>

Папиллярно-маргинально-альвеолярный индекс (РМА) - это количественная оценка тяжести воспалительного процесса в тканях пародонта. Индекс может быть выражен в виде процента от количества зубов, у которых наблюдается воспаление.

Для определения гингивального индекса РМА, десна делится на три области:

Папиллярную (Р), маргинальную (М), и альвеолярную (А).

Для количественной оценки воспалительного процесса в деснах используется шкала баллов.

1 балл - воспаление сосочка;

2 балла - воспаление края десны;

3 балла - воспаление альвеолярной десны.

Оценка проводится у каждого зуба.

$$РМА = \frac{[(\sum \text{оценка в баллах}) \times 100\%]}{3 \times (\text{число зубов})}$$

Значения индекса до 30% означают незначительную тяжесть воспалительного процесса; 30-60% - среднюю тяжесть гингивита; более 60% - тяжелая степень патологического процесса [115].

Перед началом ортодонтического лечения необходимо удостовериться в начальном статусе ортодонтического пациента и его подготовленности к лечению. В большинстве случаев, если гигиена неудовлетворительна, пациента обучают гигиене полости рта и назначают следующий визит для проверки индексов гигиены. При плохой гигиене полости рта во время ортодонтического лечения будут возникать осложнения, связанные с воспалительными процессами СОПР. При наличии воспаления СОПР неизбежно возникнут ошибки при определении биотипа СОПР перед началом ортодонтического лечения и, соответственно, выбора тактики лечения. По данным Арсениной О.И. [2], у 10% пациентов с ортодонтическим лечением был выявлен неудовлетворительный статус СОПР, который сопровождался гиперемией, отечностью десны и кровоточивостью при зондировании. У 27% пациентов возникли осложнения с пародонтом [8, 9, 11, 22, 40, 173, 178, 257, 296].

#### **1.4 Применение ИИ в сегментации трехмерных моделей по данным КЛКТ**

Конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) широко используется в стоматологии. Она может записывать обширную информацию об области верхней челюсти и лица. Благодаря информации о координатах и значении серого цвета, могут быть эффективно обнаружены многие неожиданные детали заболевания. КЛКТ была использована для оценки плотности кости, резорбции кости, а также для объемного увеличения кости. В стоматологии имплантатов существует множество методов изучения восстановления и реконструкции кости [131]. Кроме того, состояние пародонта и формы корней зубов также привлекают все большее внимание [163]. 3D-сегментация и технологии реконструкции постепенно

начинают применяться для восстановления анатомических структур зубов и окружающих тканей.

Современное развитие технологий сделало ортодонтию одной из наиболее быстро развивающихся областей стоматологии [204]. Все это стало возможным благодаря существенной эволюции оборудования для трехмерной визуализации и развитию методов обработки изображений.

Появление в 1997 году элайнеров оказало в последствии большое влияние на развитие ортодонтии. Эти аппараты учитывают индивидуальную анатомию зубов и могут выполнять перемещение зубов с оптимальными силами, безопасными для пародонта [203]. Движения зубов в этом случае более физиологичны, а полученный лечебный эффект наиболее индивидуален и соответствует форме зубных дуг, и окружающих их мягких тканей.

Появление искусственного интеллекта, который все больше привлекает внимание исследователей во всем мире, ознаменовало последнее десятилетие как переломный момент в технологическом прогрессе. Все области науки с энтузиазмом приняли искусственный интеллект, и стоматология не является исключением [221]. В связи с массовым увеличением объема информации и данных, получаемых от пациентов, все большее значение приобретает сложное программное обеспечение для сбора и хранения этих данных.

ИИ в здравоохранении переживает бум, традиционная стоматология развивается и постепенно трансформируется в цифровую стоматологию. Поскольку технологии ИИ стремительно развиваются с каждым днем, в будущем ожидается рост влияния ИИ в стоматологии, поскольку он позволяет получить огромные преимущества как для стоматологических клиник, так и для пациентов. Внедрение средств ИИ в стоматологию позволяет снизить как человеческие ошибки, так и затраты.

Использование компьютерной нейронной сети (CNN) в ортодонтической практике выводит процесс лечения на более высокий уровень. Происходит дальнейший процесс индивидуализации топологии элайнеров.

Последние исследования показывают, что при использовании сверточных нейронных сетей в случае компьютерного цефалометрического анализа результаты лучше, чем при их выполнении рентгенологом или ортодонтом вручную [119, 184, 236]. В литературе описано много исследований по автоматической идентификации цефалометрических 19 ориентиров на рентгеновских цефалометрических изображениях.

Показано, что ИИ может автоматически находить анатомические ориентиры на рентгеновских цефалометрических изображениях с очень высокой точностью. Использование CNN позволит в будущем вытеснить панорамные снимки более информативными трехмерными исследованиями КЛКТ. Это связано с тем, что точность двумерных изображений ниже, а разница в цене трехмерных и двухмерных рентгенологических исследований становится все меньше.

При подготовке к ортодонтическому лечению используются нейронные сети, которые могут провести анализ КЛКТ и определить патологии кости верхней и нижней челюсти, уровень кости или местоположение ретинированных зубов.

Все большее значение в ортодонтии приобретает анализ цифровых моделей. Для решения различных задач, связанных с сегментацией зубов и анализом цифровых моделей используются сверточные нейронные сети. Raith S. и соавторы [239] представили метод для классификации зубов с достаточной точностью с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Данная методика используется и в современном программном обеспечении.

Цифровые модели зубов, полученные интраоральным сканером, являются единым объектом, подобно гипсовой модели. Поэтому каждый зуб необходимо разделить (сегментировать) программно. После определения окклюзионной

плоскости каждый зуб выравнивается путем перемещения и ротации в соответствии с установленными алгоритмами и нормами перемещения зубов. В настоящее время для автоматизации процесса сегментации и выравнивания зубов в программах цифрового сетапа применяются методы искусственного интеллекта [282]. Программное обеспечение Autolign (Diorco.Co, Yongin, Южная Корея), автоматически сегментирует зубы и определяет лицевую ось клинической коронки (FACC), наиболее выступающую часть центральной доли на лицевой поверхности для резцов и премоляров, и буккальную бороздку для моляров [39]. После определения FACC каждого зуба и установки окклюзионной плоскости и желаемой формы дуги, выравнивание зубов производится автоматически с помощью программного обеспечения. Этот тип программного обеспечения требует от пользователя просмотра осей каждого зуба, установки окклюзионной плоскости и определения формы дуги перед выравниванием, что можно считать полуавтоматическим методом создания клинического сетапа. Полностью автоматизированное программное обеспечение автоматически сегментирует и выравнивает зубы по данным интраорального сканирования. Программное обеспечение Outcome Simulator Pro (Align Technology, Inc., Аризона, США). Ortho Simulation (Medit, Сеул, Южная Корея) - еще один пример полностью автоматизированного программного обеспечения для моделирования сетапа. Подобно Outcome Simulator Pro, Ortho Simulation встроена в программное обеспечение интраорального сканера Medit и использует сканы, полученные исключительно сканерами Medit, i500 и i700. После импортирования данных сканирования клиницист должен определить средние линии верхних и нижних зубов. Затем программное обеспечение распознает номер каждого зуба и выполняет сегментацию. С развитием технологий искусственного интеллекта программное обеспечение для цифрового сетапа стремительно развивается, что дает возможность автоматизировать ранее выполняемые вручную задачи, такие как сегментация и выравнивание зубов. Предыдущие исследования показали, что



цифровые модели сетапа, выполненные врачами вручную, имеют высокий уровень надежности [47, 149]. Однако исследований по оценке эффективности автоматизированных программ для создания сетапов не проводилось.

Цифровая модель сетапа может визуализировать окончательную окклюзию ортодонтического лечения, что делает возможным точную диагностику и планирование лечения. В сложных случаях, таких как ретенция зуба, она может использоваться в сочетании с другими типами данных пациента, такими как клинические фотографии, рентгенограммы и КЛКТ. Она также может быть использована для виртуального моделирования хирургических операций пациентам с неправильным скелетным прикусом, которым предстоит ортогнатическая хирургическая операция [290].

Для автоматизации утомительных задач, которые должны выполнять клиницисты, современные технологии CAD/CAM для цифрового сетапа были дополнены алгоритмами искусственного интеллекта. Сегментация зуба является важнейшей задачей для реконструкции 3D модели зуба. Так как в цифровых моделях используются методы сегментации зуба, при которых регистрация мезиодистальной ширины и апроксимальной поверхности зуба зависит от данных о поверхности, значит области, которые не сканируются, могут быть зарегистрированы неточно [150].

Тесные контакты зубов, смещение и скученность могут сделать автоматическую сегментацию зубов трудоемкой и сложной [185]. В алгоритмах автоматической сегментации с использованием машинного обучения и глубокого обучения уже достигнуты успехи. Kim T. и соавторы [167] предложили инструмент автоматической сегментации с воссозданием недостающих данных межзубных областей для внутриротового сканера с использованием генеративно-состязательных сетей и сообщили о полученном высоком уровне точности (рисунок 1, 2).



Рисунок 1 - Скученность переднего сегмента на трехмерной модели зубного ряда нижней челюсти



Рисунок 2 - Потеря данных в межзубных областях

В отличие от достаточно большого количества исследований в области автоматизированной сегментации зубов, мало исследований посвящено алгоритмам автоматизированного выравнивания зубов. Полностью автоматизированное программное обеспечение заявлено только в рамках консультационных целей.

Ключевой проблемой является гетерогенность морфологии человека и различные культурные нормы эстетики, что может существенно влиять на терапевтический процесс. Каждый пациент имеет свой набор заболеваний, употребляет различные лекарства, страдает от генетических заболеваний, прошлых травм и госпитализаций, что ведет к разнообразию терапевтических комбинаций [203]. После сбора анамнеза, осмотра пациента и проведения дополнительных

исследований, таких как диагностическая модель, КЛКТ и цефалометрическая рентгенограмма, составляется индивидуальный план лечения. Иногда пациент может не согласиться на предложенный план лечения [245]. Тогда ортодонт может предложить альтернативный план лечения, что еще больше увеличивает количество терапевтических комбинаций. Другой проблемой является комплаентность пациента. Полученный терапевтический эффект зависит от сотрудничества пациента и может быть недостаточным из-за плохой гигиены полости рта, неправильного использования и ухода за элайнерами, а также из-за недостаточно длительного ношения ортодонтических конструкций [120].

Нейронная сеть (НС) — это набор алгоритмов, которые пытаются обнаружить глубинные взаимосвязи в массиве данных, используя метод, имитирующий работу человеческого мозга. Под нейронными сетями в данном контексте понимаются системы нейронов, которые могут быть органическими или искусственными по своей природе [292].

Нейронные сети могут одновременно выполнять множество задач регрессии и/или классификации несмотря на то, что большинство сетей могут одновременно выполнять только одну задачу. В подавляющем большинстве ситуаций сеть будет иметь только одну выходную переменную, хотя в случае решения многих задач классификации состояний это может быть несколько выходных единиц (этап постобработки позаботится об отображении выходных единиц на выходные переменные). Входная и активационная функции блока, конструкция сети и вес каждого входного звена - все это важные характеристики искусственной нейронной сети (ИНС) [63].

Учитывая, что первые две характеристики постоянны, поведение ИНС определяется текущими значениями весов. Сначала веса обучающей сети устанавливаются в случайные значения, а затем экземпляры обучающего множества регулярно подвергаются воздействию сети. На входные блоки подаются

значения для входа экземпляра, и выход сети сравнивается с желаемым выходом экземпляра. Затем веса сети изменяются.

Для того чтобы нейронная сеть могла эффективно решать ортодонтические проблемы, необходимо загрузить соответствующее количество данных, полученных от пациентов. В случае редких аномалий количество доступных данных будет недостаточным для того, чтобы ИИ смог их распознать, поэтому потребуется много времени, чтобы нейронная сеть смогла решить клинические проблемы на том же уровне эффективности, что и ортодонт. Последняя проблема в обучении нейронной сети — это время, которое ортодонт должен потратить на аннотирование файлов DICOM, JPG, PNG и STL.

Сверточные нейронные сети в ортодонтии демонстрирует широкий спектр применения методов глубокого обучения. Результаты проведенных исследований указывают на значительное превосходство методов глубокого обучения в ортодонтии над другими высокопроизводительными алгоритмами. Исходя из данных результатов, предполагается, что методы глубокого обучения будут играть важную роль в области ортодонтии в будущем.

Существуют определенные протоколы методики расчета сил для изготовления элайнеров. В этих протоколах разработаны и специальные элементы для элайнеров, так называемые аттачменты, которые подвергаются непрерывному совершенствованию [138, 272]. С появлением новых методов обследования, компьютеризации и обработки данных разрабатываются протоколы лечения, которые позволяют наилучшим образом моделировать аппаратуру (элайнеры, Бенеслайдер, Хайрекс) [297]. Однако в настоящий момент некоторые методики обследования нуждаются в доработке.

В ортодонтии и пародонтологии существуют методы для изучения процесса развития резорбции и рецессии кости. Al-Zahrani M. и соавторы [36], Chen Y. и соавторы [77] использовали данные КТ для анализа прогрессирования болезни

пародонтита. Например, альвеолярная кость пациента резорбируется из-за прогрессирования заболевания и может привести к смещению или ослаблению нескольких зубов. Таким образом, КЛКТ может предоставить информацию о костной ткани, что поможет врачам обнаружить признаки пародонтита. Точная сегментация зубов может быть использована для анализа изменений при заболеваниях пародонта, таких как периодонтальная связка и резорбция кости определенного зуба.

При ортодонтическом лечении врачи обычно используют программное обеспечение для обработки медицинских изображений, такое как MIMICS (Materialize, Бельгия) и AMIRA (Thermo Fisher Scientific, Франция), чтобы сегментировать зубы. В соответствии с результатами сегментации врач может создать несколько соответствующих клинических программ. Программное обеспечение может реализовать автоматическую пороговую сегментацию на основе значений плотности серого, но автоматическая сегментация не может реализовать полную сегментацию ткани. Глубокое обучение, это раздел искусственного интеллекта, обладающий многими преимуществами для быстрого и точного анализа данных.

Существует три типа методов сегментации зубов: пороговый метод, метод модели активного контура и метод нейронной сети [140]. Пороговый метод основан на различных значениях серого между зубом и периодонтальной связкой. Основная проблема сегментации заключается в получении оптимального порога; однако оптимальный порог для разных выборок различен. Следовательно, для разных выборок следует повторно изучить оптимальный порог. Нео Н. и соавторы предложили оптимальную пороговую схему для сегментации зубов [139]. Однако ткань вблизи корня зуба является сложной, и трудно отличить альвеолярную кость от корня зуба с помощью одного порогового диапазона. Akhoondali Н. и соавторы предложили быстрый автоматический метод сегментации с использованием метода увеличения региона [30]. Поскольку значения серого цвета губчатой кости

и кортикальной кости вблизи корня одинаковы, зубы не могут быть сегментированы автоматически. Метод активного контура — это интерактивный метод сегментации, основанный на реконструкции контура. Контур зуба обозначается методом кратчайшей диагонали или алгоритмом установки уровня, и 3D-модель зуба является реконструкцией контура зуба [37, 46, 101, 113]. Исследование сегментации зубов, сочетающее морфологические особенности, показало, что фактическое измеренное среднеквадратичное значение корня составляет 0,39 мм, что меньше 0,4 мм [307].

Lee S. и соавторы [182] использовали метод, основанный на гистограмме, в качестве этапа предварительной обработки для вычисления среднего уровня плотности серого в областях кости и зуба. Одновременно они разработали апостериорную функцию вероятности (PPF) с моделями CNN для улучшения эффективности сегментации. Экспериментальные результаты показали, что предложенный метод лучше существующих методов. Кроме того, Lee M. и соавторы рассматривали влияние металлических артефактов во время сегментации, регулируя положение зубов, помечая все слои двух образцов КЛКТ и пять слоев других КЛКТ, а затем последовательно переходя к зубам. Результаты показали, что используемые сверточные нейронные сети могут уменьшить площадь взаимного перекрытия между блоками [78].

Поскольку значения единиц Хаунсфилда (HU) различных изображений КЛКТ противоречивы, во время сегментации используются различные методы коррекции сегментации [228]. В этом исследовании использовалась модель U-Net для сегментации данных КЛКТ для твердых тканей зуба, полости пульпы, кортикальной кости и губчатой кости одновременно. Генеративно-состязательные сети (GAN) могут быть применены к медицинским изображениям в качестве обучающих выборок, чтобы устранить проблему переобучения [76].

### **1.4.1 Глубокое обучение**

Глубокое обучение (DL) представляет собой подмножество машинного обучения, которое позволяет извлекать актуальные особенности из данных. Данные модели созданы на основе искусственных нейронных сетей с несколькими последовательными слоями: входными, выходными и скрытыми слоями, чтобы имитировать функционирование человеческого мозга. DL является важным инструментом для специалистов по обработке данных, так как позволяет быстро принимать решения и производить вычисления. Сейчас DL достиг высокой эффективности в различных приложениях, включая сегментацию костных структур лицевого скелета и отдельных зубов.

В этом разделе представлены основные сведения о сетях DL и методах обучения модели. Кроме того, описываются различные оценочные показатели, которые используются для количественной оценки эффективности автоматизированных алгоритмов сегментации.

### **1.4.2 Сегментация медицинских изображений**

#### **1.4.2.1 Сверточные нейронные сети**

Сверточные нейронные сети (CNN) - это известные глубокие нейронные сети, используемые для анализа изображений. Они достигли больших успехов в области диагностики. Типичная CNN содержит входной слой, стек функциональных слоев, в который обычно входят сверточные слои, слои пулинга и полностью связанные слои, и выходной слой. Главным образом каждая свертка применяет ядро  $n \times n$  (для двумерного входа) или ядро  $n \times n \times n$  (для трехмерного входа). Эта операция особенно полезна для получения локальных шаблонов, то есть визуальных элементов на изображениях. Затем свернутые выходные данные проходят через нормализацию пакета (BN) [152], после следует нелинейная

функция активации для выполнения извлечения карт объектов, позже происходит уменьшение выборки путем объединения слоев, чтобы захватить более значительное поле зрения. Далее полностью связанные слои используются для уменьшения размерности признаков и достижения высокоуровневого рассуждения [117, 141, 152]. Конечный результат представляет собой вектор фиксированного размера, у которого форма каждого элемента зависит от конкретной задачи (локализация объекта, классификация изображений, регрессия, сегментация на основе патчей и т.д.). Увеличение глубины (укладка множества скрытых слоев) может существенно улучшить точность или не улучшить ее в зависимости от сложности задачи.

CNN можно использовать для задач сегментации изображений [169, 213, 321]. Однако для этой задачи каждое входное изображение необходимо разбить на патчи и затем обучить CNN предсказывать метку класса центрального пикселя каждого патча. В итоге получается карта сегментации по пикселям для всего изображения путем пересылки патчей в различных позициях в CNN для классификации. Для достоверной сегментации пикселей чаще всего используется полностью сверточная нейронная сеть (FCN).

#### **1.4.2.2 Полностью сверточная нейронная сеть**

Полностью сверточная нейронная сеть (FCN) — это вариант CNN, который Long J. и соавторы [266] предложили для сегментации изображений. Они являются новаторскими сетями самых передовых методов DL для объемной сегментации медицинских изображений [146, 249, 321]. Например, Zhou X. и соавторы [321] сегментировали анатомические структуры на 3D-КТ-изображениях путем сегментации нескольких 2D-срезов из FCN, достигнув многообещающих результатов вопреки предсказаниям экспертов. FCN имеют архитектуру кодер-декодер. Кодировщик преобразует входное изображение в объект высокого уровня



представления. Затем декодер интерпретирует эти карты объектов и извлекает пространственную информацию для пиксельного прогнозирования. По сравнению с CNN на основе участков для сегментации, FCN обучается на целых изображениях без требования выбора участка. Для повышения точности сегментации было предложено множество вариантов FCN. U-Net [247], является наиболее распространенным вариантом FCN для сегментации биомедицинских изображений. Он использует пропущенные соединения между путями восходящей выборки и нисходящей выборки для восстановления потери пространственного контекста, обеспечивая точную сегментацию.

Развитие U-Net стало центральным событием в сегментации медицинских изображений. Различные работы по сегментации изображений, описанные в литературе, основаны на U-Net и его 3D-вариантах (3D U-Net [79] и 3D V-Net [210]), что обеспечивает высокую точность сегментации [275, 300]. Основываясь на FCN, Badrinarayanan V. и соавторы [43] предложили архитектуру кодер-декодер, называемую SegNet для сегментации изображения. В то время как SegNet передает индексы максимального объединения слоев с повышающей дискретизацией, FCN изучает фильтры деконволюции для повышения дискретизации (то есть добавляет относительную карту объектов из фазы кодирования).

### **1.4.2.3 Рекуррентные нейронные сети**

Рекуррентные нейронные сети (RNN) — это тип искусственных нейронных сетей, которые могут обрабатывать последовательные данные, такие как последовательности ультразвуковых изображений и МРТ. RNN способны учитывать предыдущие данные в последовательности, что позволяет им лучше понимать текущую информацию [325]. RNN сохраняют предыдущие выходные данные и используют их внутреннее состояние для принятия решения при обработке следующих входных данных. Слияние RNN и 2D FCN широко

используется при сегментации медицинских изображений для улучшения межсрезовой когерентности генерируемой сегментации [233].

#### **1.4.2.4 Автокодеры**

Автокодеры (AE) — это неконтролируемые нейронные сети, целью которых является изучение компактных скрытых представлений из входных данных. Архитектура классического автокодера содержит две основные сети: сеть кодировщика, которая сжимает входные данные и выдает код, и сеть декодера для восстановления данных обратно во входное измерение с использованием этого кода. Поскольку изучаемые представления обычно включают полезную информацию, группа исследователей использовали автокодеры для извлечения общих семантических признаков и информацию о форме из исходных данных для руководства сегментацией изображения сердца [219, 314]. Oktay O. и соавторы [219] для лучшего анализа изображений разработали остаточную сверточную сетевую модель восстановления 3D-объемов из полного стека 2D-изображений.

#### **1.4.2.5 Генеративно-состязательные сети**

Генеративно-состязательные сети (GAN), предложенные Goodfellow I. и соавторы [124], основаны на генерации модели для создания новых синтетических образов. GAN в процессе обучения учатся генерировать с помощью двух соперничающих сетей, конкурирующих друг с другом: сети-генератора и сети-дискриминатора. Генератор предназначен для искусственного создания поддельных изображений на основе полученного им случайного шума, в то время как дискриминатор используется для определения того, является ли изображение “реальным”. GAN успешно применяются к задачам сегментации. Сеть сегментации заменяет генератор. Дискриминатор необходим для того, чтобы отличить

сгенерированные карты сегментации от карт золотого стандарта [196, 258]. Lau F. и соавторы [179] предложили сеть ScarGAN для моделирования области здорового миокарда и искусственного увеличения тренировочных наборов с помощью цепочки GAN. Тренировка U-Net с дополнительным сканированием имитированной ткани объекта продемонстрировала более точную сегментацию на тестовых изображениях (“80,5%” против “75,9%”).

#### **1.4.2.6 Усовершенствованные модули построения**

Недавно группа исследователей внедрила усовершенствованные модули построения, чтобы изучить улучшенные функции для точной сегментации изображений. Эти модули широко использовались для повышения эффективности сегментации изображений в предыдущих нейронных сетях. Следовательно, можно говорить о трех различных типах современных методов:

а) расширенные сверточные блоки для многоуровневой совокупности функций (например, глубокий контроль [181] начальные модули [271], расширенные сверточные ядра [312], обширное объединение пространственных пирамид [72]);

б) адаптивные сверточные ядра для захвата наиболее релевантных функций (например, блоки внимания [283], блоки сжатия и возбуждения [145]);

в) межслойные соединения для восстановления предыдущих функций в следующих слоях (например, остаточные соединения [135], плотные соединения [34]).

### 1.4.3 Обучение нейронных сетей

Процесс обучения является наиболее сложным этапом в методах DL из-за сложности вычислений и конфигурации, необходимой для их выполнения. Для этого процесса необходим набор данных, включающий парные изображения и основополагающие истины, оптимизатор и функция потерь. Обучение модели направлено на получение лучших параметров сети, чтобы уменьшить функцию потерь.

#### 1.4.3.1 Оптимизатор градиентного спуска

Глубокая сеть содержит миллионы параметров, представляющих собой математическое решение такой задачи. Обученная сеть адаптируется к процессу обучения в соответствии с определенным набором параметров путем оптимизации многих сетевых атрибутов. В частности, градиентный спуск — это алгоритм оптимизации для уменьшения функции потерь. Были разработаны различные оптимизаторы градиентного спуска (например, Momentum SGD [237] AdaGrad [90], Adam [168]).

#### 1.4.3.2 Функции потерь

В процессе обучения уменьшается сетевая ошибка с помощью функции потерь, которая оценивает, насколько хорошо алгоритм обучения соответствует набору данных. С этой целью для проектирования и настройки сети обязательно требуется подходящая функция потерь. Учитывая серию парных изображений и меток  $\{(x_i; y_i): i = 1 \dots; N\}$ , сеть узнает ссылку отображения  $x \rightarrow y$ . Таким образом она предсказывает результат  $(\hat{y})$ , максимально приближенный к основополагающей истине  $(y)$ .

**Средняя квадратичная ошибка (MSE)**, также известная как **потеря L2**, является функцией потерь по умолчанию для задач регрессии, таких как реконструкция изображения, локализация зубов или патологий кости. MSE определяется как:

$$L_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

где  $y_i$ ,  $\hat{y}_i$  обозначают векторы золотого стандарта и прогнозируемых значений,  $N$  представляет количество выборок набора данных.

**Перекрестная энтропия (CE)** - наиболее часто используемая функция потерь для задач классификации и сегментации изображений. При многоклассовой сегментации для каждого класса эта потеря возобновляет попиксельные вероятностные ошибки между фактической картой золотого стандарта и ее относительным прогнозируемым результатом.

Специально для сегментации изображений несколько исследователей использовали **функцию soft-Dice loss** [210], которая так наказывается за несоответствие между фактической картой золотого стандарта и соответствующей ей прогнозируемой сегментацией на уровне пикселей.

Более того, различные варианты функций потерь перекрестной энтропии и soft-Dice (например, **взвешенная потеря перекрестной энтропии** [49, 156] и **взвешенная soft-Dice loss** [166, 309]) широко используются для решения проблем дисбаланса классов в задачах сегментации медицинских изображений, в которых значение потери взвешивается с учетом нечастых категорий. Несколько других сетей DL используют **гибридные потери**, в которых объединены различные функции потерь (например, **focal loss** [73], soft-Dice loss и взвешенная перекрестная энтропия), чтобы облегчить проблему дисбаланса классов и, таким образом, повысить качество выполнения сегментации [310, 311].

### 1.4.3.3 Уменьшение чрезмерной подгонки

Из-за ограниченного размера обучающих наборов данных по сравнению с числом обучаемых параметров в глубокой модели чрезмерная подгонка является самой большой проблемой при обучении глубоких моделей. Ниже мы рассмотрим несколько методов преодоления этой проблемы: обучение на наборах данных ограниченного размера.

**Инициализация веса** [122, 136, 211] является важным выбором концепции, целью которой является препятствовать исчезновению или взрыву выходных данных активаций уровня в процессе прямой передачи сетей DL.

**Отсев** [141, 270], метод регуляризации, позволяющий избежать переобучения путем случайного удаления части узлов в сетях DL на каждой итерации обучения, является одной из широко используемых функций для повышения эффективности сети.

**Увеличение данных** [69, 317] является эффективным методом, используемым при обучении моделей, при котором увеличивается количество входных данных путем искусственного генерирования обучающих изображений посредством применения совокупности аффинных преобразований к существующим данным.

**Трансферное обучение** — это метод глубокой сети, который направлен на повторное использование модели, предварительно обученной на существующих больших наборах данных, используя ее знания, полученные для этой задачи. Модель может быстро сходиться даже с ограниченными данными. В нескольких работах был доказан потенциал трансфертного обучения в улучшении способности сети к обобщению для сегментации медицинских образцов [74, 99, 166].

#### 1.4.4 Показатели оценки

Для оценки эффективности методов сегментации можно использовать такие показатели, как количественная точность, время вывода и использование памяти. Кроме того, для оценки геометрического сходства часто используются Dice similarity coefficient или Hausdorff distance, зарекомендовавшие себя как хорошие показатели оценки геометрического сходства. Вычисляется показатель разности объемов для оценки 3D-сегментации образца, чтобы визуализировать эффективность подхода с точки зрения объема. С помощью количественных показателей можно сравнить несколько методов по контрольным показателям (ручное контурирование), качественные результаты имеют важное значение для принятия решения о том, какой метод является наилучшим.

**1. Dice similarity coefficient (DSC)** – достаточно известный показатель при проверке сегментации медицинских изображений. Он обычно используется для вычисления сходства между прогнозируемыми картами и картами золотого стандарта. Диапазон его значений составляет от 0 (несоответствие) до 1 (отличное соответствие).

$$DCS = 2 \frac{|P \cap G|}{|P| + |G|},$$

где P, G обозначают прогнозируемые карты и карты золотого стандарта соответственно.

**2. Hausdorff distance (HD)** [208] вычисляет степень сходства между двумя наборами точек: расстояние между двумя границами золотого стандарта и прогнозируемой сегментацией. Это дополнительная статистика к DSC. HD идентифицирует сегментации с большими локальными различиями, хотя они были хорошо сегментированы. Более низкое значение HD отражает более высокую производительность сегментации. Показатель определяется следующим образом:

$$HD = (\max_{p_i \in P} (\min_{g_j \in G} (d(p_i, g_j))), \max_{g_i \in G} (\min_{p_j \in P} (d(p_i, g_j)))) ,$$

где  $P = \{p_i : i = 1; \dots; N_p\}$ ,  $G = \{g_j : j = 1; \dots; N_g\}$  обозначают прогнозируемые карты и карты золотого стандарта соответственно,  $d$  представляет расстояние между  $p_i$  и  $g_j$ .

**3. Абсолютная разница в объеме (AVD)** измеряет среднюю разницу по целому набору срезов между прогнозируемым объемом и золотым стандартом.

Таким образом, DL вызвало исследовательский бум и стало двигателем развития в области обработки изображений. Выше описаны различные нейронные сети и несколько методов обучения модели. Приведен краткий обзор оценочных показателей для сегментации изображений.

#### 1.4.5 Современные методы сегментации медицинских изображений

Сегментация медицинских изображений, то есть разделение изображения на несколько определенных наборов органов или пораженных органов с помощью методов медицинской визуализации, является одной из важнейших задач при анализе медицинских изображений, которая помогает врачам в постановке диагноза и принятии важных решений. В предыдущие годы многие исследователи применяли сети на основе DL для сегментации медицинских изображений [70, 110, 133, 212, 231, 249, 280, 301, 303, 313, 315, 322]. Автоматизированная сегментация превзошла по точности классические методы сегментации, включая метод порогового значения [302], метод на основе границ [80] и метод на основе регионов [132].

Тао S. и соавторы предложили метод сегментации изображений зубов с использованием сети U-Net, модуля внимания, модулей SAP и CE. Экспериментально продемонстрированная модернизированная сеть показала



лучшую производительность и эффективность сегментации, что привело в итоге к более четким контурам зубов, что способствовало лучшей диагностике. Предлагаемый метод предназначен только для сегментации изображений зубов и не применяться в других областях [276].

Сложная сегментация костей лицевого скелета (нижней челюсти и верхней челюсти) на компьютерной томографии (КТ) необходима для диагностики и планирования лечения при хирургических вмешательствах в области черепа и лица, в ортодонтии, а также в терапии и эндодонтии. Традиционная ручная сегментация является трудоемкой и сложной из-за таких свойств костей черепно-лицевой области, как разнообразие анатомических структур, из-за низкого контраста мягких тканей и из-за искажений, вызванных металлическими конструкциями. Однако методы сегментации, включая глубокое обучение, требуют большого и последовательного набора данных, что в свою очередь и создает сложности в их клинических применениях как раз из-за ограниченного количества данных. В различных исследованиях предлагаются подходы глубокого обучения для автоматической сегментации нижней и верхней челюстей на КТ-изображениях путем совмещения многоцентровых наборов данных. В исследованиях Park S. четыре многоцентровых набора данных, полученных в различных условиях, были использованы для создания сценария, в котором модель обучалась на одном наборе данных, а оценивалась на других наборах. Для нейронной сети был разработан иерархический, параллельный и многомасштабный остаточный блок данных для U-Net (HPMR-U-Net) [293]. Для оценки производительности была проведена сегментация с собственным набором данных и с внешними наборами данных из мультицентров в сравнении с тремя другими нейронными сетями: U-Net, Res-U-Net и mU-Net. Результаты свидетельствуют о том, что производительность сегментации HPMR-U-Net сравнима с другими моделями, с отличной совместимостью данных [224].

Перед использованием данных КТ применяется их предварительная обработка. Применяется подход глубокого обучения для уменьшения влияния артефактов, создаваемых металлами (MAR) на стоматологических КТ-изображениях. Он включает в себя обучение сети сегментации для металлических объектов, исправление данных проекции с использованием сегментированной области, слияние исправленных и исходных изображений КТ и замену металлических областей в исходных данных проекции. Предложенный метод превосходит традиционные методы постобработки данных, основанных на сегментации металлов в области КТ-изображения [137].

#### **1.4.5.1 Распространенные архитектуры DL для сегментации медицинских изображений.**

2D U-Net. Основываясь на архитектуре FCN, Ronneberger O. и соавторы [247] предложили сеть U-Net для сегментации биомедицинских изображений. Эта модель включает в себя U-канал, состоящий из двух путей анализа (сужение) и синтеза (расширение), и пропускные связи, соединяющие слои сужающегося пути с их аналогами расширяющегося, чтобы обеспечить им важнейшие функции высокого разрешения. Сетевая архитектура использует две свертки  $3 \times 3$ , за которыми следует функция повторной активации и операция максимального объединения для уменьшения размера скрытого изображения. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет получен единственный вектор признаков, полезный для восстановления изображения с вероятностно классифицированными пикселями для точной сегментации путем включения переданных выходных данных во время пути анализа. Предлагаемая сеть одновременно объединяет карты объектов низкого уровня для повышения точности с картами объектов высокого уровня для извлечения сложных объектов.

Благодаря своей выдающейся эффективности U-Net и ее варианты (интеграция новых модулей и другие концепции) нашли широкое применение во многих областях компьютерных вычислений [49, 125, 316, 320, 326]. Гордиенко Ю. и соавторы [125] использовали сеть на базе U-Net для сегментации легких с использованием рентгеновского сканирования. Их дизайн обеспечивал быструю и точную сегментацию изображения. Farrag N. и соавторы [102] сравнили несколько автоматизированных интегрированных систем для сегментации образца на нативных и улучшенных контрастом T1-картах. Эти авторы доказали, что архитектура U-Net достигла лучших результатов, чем Dense Nets и Attention Nets, что указывает на надежность метода, основанного на U-Net, в клинических приложениях.

#### **1.4.5.2 2.5D методы**

Некоторые сети, выполняющие сегментацию медицинских изображений, основаны на подходах 2.5D. Эти подходы используют преимущества 3D-сегментации за счет интеграции (частичной) 3D-информации для улучшения сегментации, принимая во внимание, что это позволяет избежать проблем с высоким потреблением памяти. Одним из наиболее частых методов является использование ансамбля 2D CNN, который применяется к трем ортогональным проекциям в разных направлениях (то есть к осевому, коронарному и сагиттальному проекциям) [234]. Такой 2.5D подход имеет более богатую пространственную информацию о соседних пикселях с меньшими вычислительными затратами, чем 3D [320]. Эти исследования продемонстрировали немного улучшенную точность по сравнению с 2D. Поскольку 3D-объем представляет собой стопку смежных 2D-срезов (2D-изображение с соседними срезами), другие альтернативы интегрировали информацию о соседних срезах для создания трехмерного временного контекста для повышения производительности

сегментации. Ganauem P. и соавторы [114] подключили соседние срезы к центральному в качестве различных входных каналов. Некоторые авторы исследовали систему проектирования 2.5D, сочетающую 2D и 3D методы [305, 308].

Zheng Q. [319] использовал архитектуру на основе U-Net, которая обеспечивает пространственно согласованные результаты для всего объема за счет распространения сегментации по срезам для выполнения 2D-сегментации. Moeskops P. и соавторы [213] предложили 2.5-D подход для оценки того, может ли один CNN выполнять несколько задач сегментации. Авторы доказали эту концепцию, используя несколько методов (например, МРТ головного мозга, МРТ молочной железы и КТ-ангиографию сердца) для каждой из трех задач сегментации. Их результаты показали, что такая система может визуализировать разнообразные анатомические структуры с помощью нескольких методов без специальной подготовки. Другие подходы 2.5D предлагали гибридную сегментацию изображений с использованием сети DL, объединенную со статистическим моделированием формы. Например, Wang C. и Smedby O. [291] соотнесли выходные данные ортогональных 2D U-Net с предварительным приданием объемной формы для лучшего очертания.

### **1.4.5.3 Полностью объемные подходы (3D-подходы)**

Далее описываются две современные сети, основанные на обработке 3D-данных. Большинство из авторов расширили основную идею 2D-подходов и модифицировали ее для более многомерного пространства [79, 88, 210]. По сравнению с 2D и 2.5D подходами объемные изображения могут предоставлять полную 3D-информацию в различных ориентациях, а не в одном или трех ортогональных видах. Тем не менее, одна из основных проблем таких 3D-сетей заключается в их более высоких требованиях к потреблению ресурсов, из-за

увеличенного размера пространственных параметров модели, что ограничивает их применение.

#### 1.4.5.4 3D U-Net

Одним из наиболее известных вариантов архитектуры U-Net, дополняющих ее наиболее полной информацией о пространственной согласованности, является 3D U-Net, предложенный Çiçek Ö. и соавторами [79]. Они расширили архитектуру U-Net, заменив 2D-операции их объемными аналогами. Предложенный алгоритм обеспечивал плотную объемную сегментацию на основе изученных разреженных 2D-аннотаций. Он плотно сегментировал новые данные. Значительные результаты продемонстрировали его эффективность в сложных и сильно изменчивых 3D-структурах.

Появление 3D U-Net представляет большой интерес для обработки объемных изображений. Многие методы объемной сегментации повторно используют трехмерную модель U-Net [49, 100, 153, 227, 309]. Например, Fahmy A. и соавторы [100] предложили 3D-модель на основе U-Net со скользящим окном для обработки больших стеков входных данных. Yang X. и соавторы [309] разработали полностью автоматическую сеть для сегментации структуры образца. Их сеть аналогична [79], но они заменяют (оператор конкатенации) оператор объединения Остаточным Модулем Residual Unit (ResU). Глубокая контрольная обратная связь и передача обучения используются для улучшения процесса обучения. Используя Коэффициент Подобия Многоклассовых Кубиков (Multi-class Dice Similarity Coefficient), эта сеть достигла многообещающих результатов.

### 1.4.5.5 V-Net

В [210] предлагается модель V-Net для сегментации объема МРТ на основе объемного CNN. Вклад авторов, это создание новой целевой функции, основанной на DSC. Они также использовали 3D-свертки с размером ядра 2x2x2 и шагом 2. Свертки заменили объединения с преимущественно меньшим объемом памяти. Нелинейности PReLU [136] использовались во всей модели. Подобно [247], они распространили особенности, извлеченные из пути сжатия, на путь распаковки для получения подробных сведений, что дает двухканальную объемную сегментацию на последнем конволюционном слое.

Экспериментальная оценка продемонстрировала, что модель V-Net достигла хороших результатов в наборе данных тестовых заданий [187]. Например, Vesal S. и соавторы [285, 286] провели многочисленные эксперименты и выполнили интересные сравнения показателей V-Net, 3D U-Net и нескольких вариантов последней, включая многоступенчатый подход, для многоклассовой сегментации в наборе данных автоматизированной кардиологической диагностики (ACDC). Gibson E. и соавторы [118] предложили архитектуру, основанную на глубоком обучении, известную как DenseVNet, с большим рецептивным полем (receptive field) для сегментации восьми органов. По сравнению с [210], DenseVNet получил значительно более высокие показатели DSC для всех органов.

### 1.4.5.6 Сегментация на основе FCN

Tran P. [279] использовал FCN [267]. Их автоматизированный метод, основанный на FCN, достиг значительной эффективности сегментации по сравнению с классическими методами с точки зрения скорости и точности. Множество более продвинутых исследований, основанных на FCN, были разработаны для достижения значительных улучшений в эффективности сегментации. Было проведено много исследований по оптимизации архитектуры

модели, чтобы улучшить обучающий потенциал функций для сегментации [83, 99, 156, 166, 183, 316, 323]. Например, в [166] предлагается плотная U-Net с начальными модулями для объединения масштабных возможностей для точной сегментации изображений с широкой анатомической вариабельностью. В [233] Poodle R. и соавторы разработал повторяющийся FCN (RFCN), базирующийся на GRU (управляемых рекуррентных блоках) разновидности LSTM (длинная цепь элементов краткосрочной памяти) [142], и сетях FCN для изучения представлений изображений из стеков 2D-изображений и выполнении сегментации. RFCN объединяет обнаружение и сегментацию в уникальную архитектуру. В многочисленных работах [73, 156, 256, 309] было предложено несколько функций потерь (например, взвешенная потеря перекрестной энтропии, weighted Dice loss и focal loss) для лучшего проведения сегментации. Из-за артефактов движения при сканировании магнитным резонансом, ограничивающим применимость 3D-подходов для сегментации [49], большинство сетей на основе FCN используют 2D-архитектуры, которые лучше справляются в этих случаях.

#### **1.4.5.7 Временная и пространственная согласованность**

Поскольку 2D-сети используются для обработки каждого 2D-среза целого объема вместо 3D объема, основным недостатком применения 2D-сетей сегментации является то, что они работают послойно, без изучения межсрезовых зависимостей. Таким образом, 2D-моделей может быть недостаточно для сегментации зубов на срезы, где границы не сильно очерчены. Многочисленные исследования использовали дополнительную контекстную информацию, такую как предварительные формы [71, 326], чтобы преодолеть эту проблему и, таким образом, улучшить сегментацию 2D FCN. Несколько других методологий использовали рекуррентную нейронную сеть и модели с несколькими срезами (2.5D модели) [227, 233, 320], чтобы ввести пространственные ограничения для

улучшения сегментации стека срезов. Эти модели также используются для выделения пространственно-временной информации по кадрам сердечного цикла для улучшения эффективности сегментации [238, 258, 298, 306].

#### **1.4.5.8 Анатомические ограничения**

При использовании в процессе обучения только стандартных функций потерь, может не получиться извлечь особенности соответствующих анатомических структур. Таким образом, в различных работах изучалось преимущество интеграции анатомических ограничений на этапе обучения для идеального прогнозирования модели. Эти ограничения, представленные в виде условий регуляризации для учета предварительных знаний (например, топология [81], контур [71] и форма [220, 311, 327]), заставляют модель выдавать более точные результаты сегментации. Oktay O. и соавторы [220] предложили модель нейронной сети с анатомическими ограничениями, которая включает предварительные знания о сегментации на основе CNN с помощью сети автокодирования. Его выходные данные принудительно приводятся в соответствие с нелинейным компактным представлением, лежащим в основе анатомии. Zotti C. и соавторы [327] разработали сеть на основе GridNet, которая прежде интегрирует форму объекта, чтобы помочь кинетической сегментации. В отличие от этих моделей Rainchaud N. и соавторы [222] разработали вариационные автоэнкодеры (Variational Autoencoders (VAE)) для уточнения выходных данных сети путем исправления анатомически неправдоподобных масок сегментации на этапе постобработки.



#### **1.4.5.9 Многоступенчатые модели**

Различные автоматизированные сети были разработаны с использованием многоступенчатого конвейера, разделяя основную задачу сегментации на подзадачи [186, 274, 287, 288, 299, 320]. Важным этапом в методе сегментации является автоматическая локализация целевой структуры в объеме МРТ для сегментации срезов на основе результата локализации, что снижает вычислительную сложность. Vesal S. и соавторы [287] первоначально оценивали грубую карту плотности, локализующую интересующую структуру, для последующей фокусировки второго этапа моделирования (сегментации) в зоне интереса (Region of interest (ROI)). Их сеть достигла лучшей эффективности сегментации, чем предыдущие методы сегментации на основе сверточных нейронных сетей. Кроме того, Omega-Net, разработанный Vigneault D. и соавторами [288], включает несколько этапов: сначала достигается начальная сегментация на входном изображении, затем признаки, изученные на этом начальном этапе, используются для прогнозирования параметров, необходимых для преобразования изображения в каноническую ориентацию. Наконец, преобразованное изображение сегментируется.

#### **1.4.5.10 Гибридные подходы к сегментации**

Некоторые подходы фокусируются на методах слияния DL с традиционными методами сегментации, такими как деформируемые модели [41, 206], алгоритмы сегментации с разрезом графика [195] и методы наборов уровней [89, 217] для лучшего обобщения. Модели DL используются для извлечения информативных признаков и этапов инициализации, чтобы свести к минимуму зависимость от ручного взаимодействия и достичь более высокой эффективности сегментации. Выведенная форма интегрируется в деформируемые модели, чтобы добиться хорошего компромисса для более точного результата сегментации. Аналогичным

образом, Ngo T. и соавторы [217] применили Сеть Глубокого Убеждения Deep Belief Network (DBN) для разработки метода определения уровня для точной сегментации.

## Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились с использованием программного обеспечения и современного медицинского оборудования. В ходе исследования был разработан алгоритм работы и представлена блок-схема, отражающая этапы протокола лечения на элайнерах. Каждый этап проводился независимо: получение цифровых моделей челюстей, используя интраоральный сканер, анализ данных КТ, фотопротокол, определение биотипа СОПР. Была составлена цифровая карта слизистой полости рта каждого пациента. Методом конечных элементов был проведен анализ топологии элайнеров. Результаты, полученные на этапе обработки, были совмещены в объединенную модель. Результаты этих исследований стали основой для внесения изменений в этапы лабораторной работы. Составленный протокол лечения содержал оптимизированные ортодонтические конструкции и их трехмерные модели. Степень модификации индивидуализированного плана лечения зависела от задач, поставленных врачом-ортодонтом. Современный полный протокол ортодонтического лечения представлен на рисунке 3. Данная блок-схема представляет собой протокол цифрового ортодонтического лечения с визуализацией хода работы и возможностью выбора последовательности исследований для достижения поставленных целей.

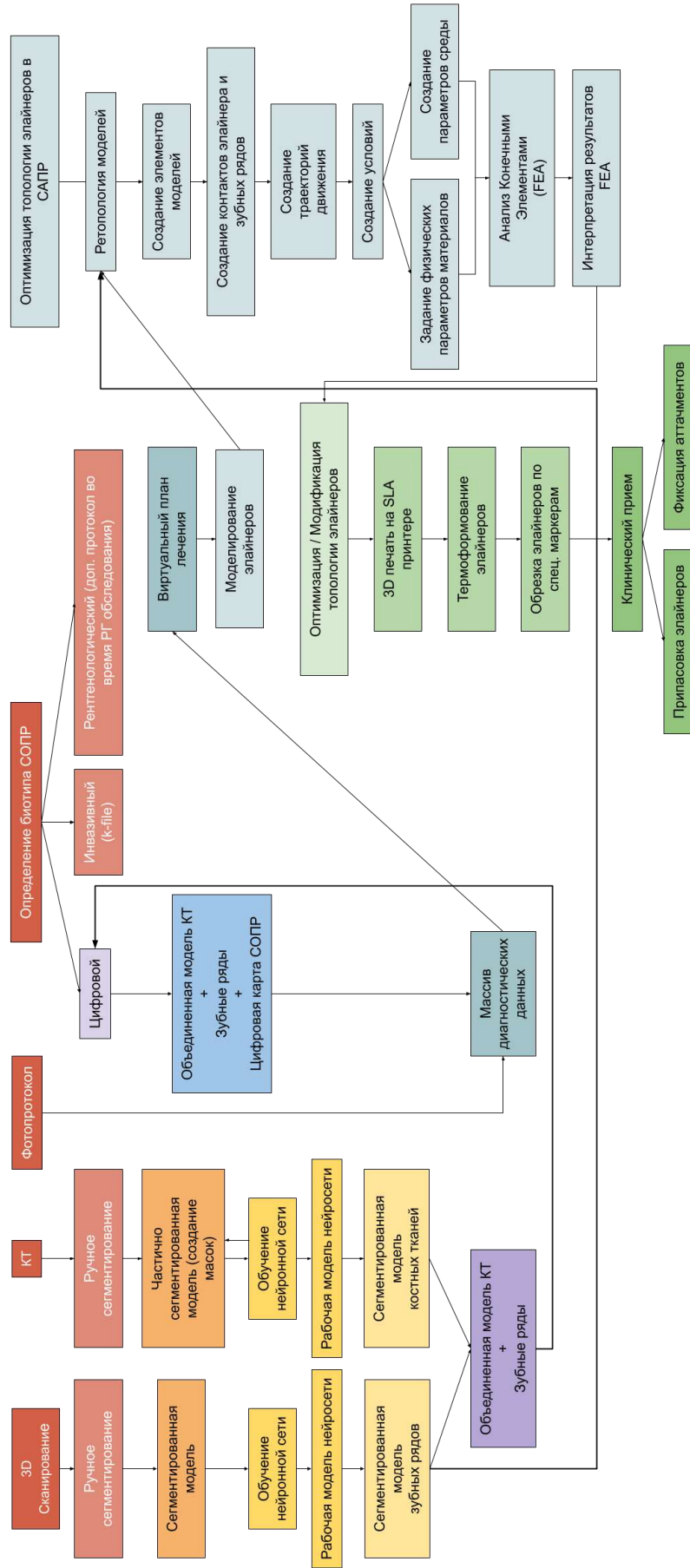


Рисунок 3 - Блок-схема диссертационной работы

## 2.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов

Подготовка к сканированию выполнялась по предложенным формам в цифровом виде в программном обеспечении 3Shape TRIOS Design studio (Копенгаген, Дания) и Planmeca Romexis® CAD/CAM (Хельсинки, Финляндия), в которых заполняются данные пациентов, им присваивается индивидуальный номер, который используется в дальнейшем исследовании при работе уже с анонимными данными.

Выполняется алгоритм подготовки сканирующего оборудования 3Shape trios 3, iTero® Element™, Planmeca Emerald S, затем выбирается режим сканирования двух челюстей и выполняется процесс сканирования.

Процесс интраорального сканирования проводится в соответствии с алгоритмом, предложенным производителями, и рекомендациями специалистов.

В связи с особенностями получения, обработки и оптимизации оболочки трехмерных моделей обязательно необходимо выполнить ручной контроль каждой модели в программе Meshmixer. В ходе которого выявляются перемычки и мосты отдельных полигонов, которые удаляются и заполняются искривленной поверхностью. Это важный для программного обеспечения критерий, без учета которого, процесс обработки и сегментации моделей будет невозможен. Для продолжения работы в программном обеспечении у моделей проводится удаление лишних областей, и выполняется конечная обработка краев.

Далее выполняется цифровое моделирование плана лечения ортодонтических пациентов при лечении на элайнерах.

Предустановка цифровых моделей зубных рядов проводилась по алгоритму в соответствии с инструкциями производителя программного обеспечения (ПО). Ручная сегментация и постановка осей зубов также производится по алгоритмам, прописанным производителями ПО Maestro Ortho Studio 5.

Моделирование перемещения зубов производилось сегментарно по алгоритмам сочетания перемещения отдельных зубов.

Шаг элайнера ограничивается 0,25 мм корпусного перемещения или 2 градусами ротации.

Сочетаемые одновременные движения зубов:

- 1) Ротация и неконтролируемый наклон (TIP)
- 2) Ротация и мезио-дистальное движение
- 3) Ротация и интрузия
- 4) Вестибуло-оральное движение и интрузия
- 5) Неконтролируемый наклон и интрузия
- 6) Вестибуло-оральное движение и мезио-дистальное движение
- 7) Неконтролируемый наклон и мезио-дистальное движение
- 8) Вестибуло-оральное движение и неконтролируемый наклон

Несочетаемые движения:

- 1) Ротация и вестибуло-оральное движение
- 2) Ротация и экструзия
- 3) Вестибуло-оральное движение и экструзия
- 4) Неконтролируемый наклон и экструзия
- 5) Мезио-дистальное движение и экструзия

Аттачменты моделировались согласно протоколам Invisalign.

Дополнительные элементы устанавливаются согласно алгоритмам:

- 1) Перемещение третьих моляров
- 2) Устранение диастемы более 6 мм
- 3) Устранение скученности зубов с дефицитом места более 6 мм
- 4) Лечение вертикальной резцовой дизокклюзии более 3,5 мм
- 5) Лечение глубокой резцовой окклюзии передних зубов 2,5 мм

- 6) Смыкание моляров и клыков по II классу более 5 мм
- 7) Устранение смыкания моляров и клыков по III классу более 4 мм
- 8) Закрытие промежутков после удаления моляров и премоляров.

Виртуальные модели элайнеров создавались в Autodesk Meshmixer (Autodesk Inc., Сан-Рафаэль, Калифорния). Область обрезки выполнялась путем выделения полигонов инструментом кисть и методом экструзии полигонов на 1 мм. Далее выполнялось выдавливание полигонов модели с повторением контактной поверхности зубов, мягких тканей и модели элайнера. Во избежание искажения контактных поверхностей элайнера и контактных поверхностей зубных рядов выполнялось ручное сглаживание нависающих краев и удаление отдельных полигонов.

Создание понтиков и усиленных балочных понтиков проводится по тем же алгоритмам, что и моделирование элайнера.

## **2.2 Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами**

При моделировании виртуальной модели элайнеров были взяты физические свойства PET-G материала и внесены в рабочую среду программного обеспечения ANSYS Workbench 2019 R1 (ANSYS V.18; ANSYS Inc., Канонсбург, США). Свойства гиперпластичности взяты из значений, приведенных производителем для 22°C (Cristal PET-G; Bio-Art, Бразилия). Плотность (1314,8 кг м<sup>-3</sup>) и коэффициент Пуассона (0,31) были взяты из таблицы данных, изотропная эластичность была рассчитана из значений модуля Юнга (2000 МПа) и предела прочности при растяжении (26 МПа).

Свойства сетки в области контакта были уменьшены на коэффициент глобального размера элементов 0,55 (1,65 мм), был выбран коэффициент размера

деформаций (0,05) с функцией захвата кривизны. Свойства сетки, которых не было в области контакта, моделировались более крупными элементами. Размер элемента 3.0 мм был выбран с минимальным размером деталей, который разрешается сеткой (0,5 мм) и мягким поведением.

Характеристики физических свойств материалов, которые не были указаны производителем, были взяты из данных научных исследований. В связи с тем, что табличных значений ни в литературе, ни у производителя материалов указано не было, данные были обработаны через интеллектуальный трассировщик данных Easy Trace Pro (Easy Trace Group, Россия).

Элемент управления размером сетки при создании элементов рабочих моделей зависит от формы размеров моделей зубных рядов. Контактные поверхности, участвующие в контактных расчетах, описываются по типу размера элемента (definition: element size) в 1 мм, это минимальный размер деталей, который разрешается сеткой (defeature Size) 0,1 мм. Темп роста (growth rate) - увеличение длины кромки элемента в каждом следующем слое элементов составляет по умолчанию 1,5. Нормальный угол кривизны (curvature normal angle) - максимально допустимый угол, которым может охватываться кромка одного элемента – по умолчанию 60 градусов. Локальный мин. размер (local minimum size) - минимальный размер элемента – 0.1 мм.

Путь введения элайнера описан общей траекторией и может меняться в зависимости от анатомии или аномалии зубных рядов.

### **2.3 Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР**

Моделирование цифровой карты СОПР в Cloud Compare V2 основано на измерении расстояний между вершинами полигонов двух моделей с заданными параметрами шкалы градации цветов. Плавающая цветовая градация не дает



постоянства измерений, хотя в числовом эквиваленте это не играет никакой роли. Однако в данном анализе используется визуальный характер оценки, поэтому фиксированная градация обязательна перед началом анализа. Она также основана на классификации биотипа слизистой полости рта, описанной в литературе.

Ручное сегментирование проводилось по заданным алгоритмам и проверялось наличием артефактов и неточностей. Трехмерная модель должна соответствовать костным структурам и не выходить за рамки тканей исследуемого. Модель не должна иметь недостаток костных тканей в трехмерной оболочке и должна быть закрытой. Mimics inPrint 2.0 позволяет создавать закрытые модели. Оптимальное значение подбирается методом пороговых значений и дорабатывается ручным способом в местах, где присутствуют артефакты. Из-за неоднородности плотности структур в одном КТ исследовании проводится сегментарное выделение областей интереса с применением пороговых значения по шкале Хаунсфилда. Из полученных масок на каждом слое создается модель с заранее заданными параметрами сглаживания и компенсацией сжатия модели. В Mimics Medical 21.0 настройка сохраняется для интерпретации всех исследований.

Объединение моделей зубных рядов и сегментированных моделей из КТ проводится в ProPlan CMF 3.0 с предварительным их выравниванием. Кистью отмечаются только совпадающие анатомические структуры, после чего производится статистическое наложение моделей по выбранным областям.

## **2.4 Обучение нейронных сетей**

При обучении нейронной сети использовалось программное обеспечение Dragonfly (v.2022.2, Objects Research Systems, Монреаль, QC, Канада). Вначале проводится нормализация цифровых параметров стека данных КТ в 32 битный формат с параметром числа с плавающей запятой. Оригинальное изображение конвертируется с параметром нормализации от 0 до 1, параметры минимальной и

максимальной интенсивности по шкале Хаунсфилда задаются вручную. Все, что не попадает в заданный параметр получает значение 0. Данная нормализация индивидуальна для каждого КТ исследования, поэтому необходимо вручную задавать границы интереса. До начала обучения создаются кадры с масками выбранного слоя. Кадр обучения сегментируется по тем же критериям, что и создание масок при ручном сегментировании. Для каждой анатомической структуры создается отдельный слой: для костной ткани верхней челюсти, для нижней челюсти, для зубного ряда верхней и нижней челюстей. После создания масок необходимо задать фоновый слой, заполняющий все неотмеченное масками пространство. Для обучения нейросети создается модель глубокого обучения с четырехслойной архитектурой U-Net. После этого проводится предсказание выбранного слоя, а затем обучение модели. После добавления кадров с коррекцией предсказания проводится переобучение модели. Проверка качества обучения оценивается числовым значением модели и предсказанием на выделенном слое.

Обученная модель используется для сегментации КТ под управлением ИИ, а также выполняются небольшие корректировки с целью достижения наилучшего результата. Полученные сегментированные модели экспортируются из программного обеспечения в формате stl.

## **2.5 Лабораторный этап**

Подготовка трехмерных моделей для печати на трехмерном принтере в Photon Workshop V2 осуществляется путем добавления трехмерной модели одновременно с настройкой параметров печати, которые задаются в соответствии с выбранной смолой, и описаны в документации производителя. Перед началом печати осуществляется калибровка печатной платформы. После окончания печати все модели промываются от излишков смолы (resin) и проводится засветка модели в ультрафиолетовой камере.

Параметры смолы позволяют без разрушения модели проводить термоформирование элайнера:

- 1) Жесткость — 79 D по Шору
- 2) Вязкость (25 °C) — 552 МПа\*с
- 3) Плотность в жидком состоянии — 1,1 г/см<sup>3</sup>
- 4) Плотность в твердом состоянии — 1,184 г/см<sup>3</sup>
- 5) Усадка — 7.1%
- 6) Прочность на растяжение — 23,4 МПа
- 7) Удлинение при разрыве — 14.2%

Термоформирование элайнеров из пластика Cristal PET-G (Bio-Art, Бразилия) проводится путем нанесения разделительного силикона на модель непосредственно перед формированием и созданием вакуума под моделью с помощью Bio-art PlastVac P7.

Обрезка и полировка краев элайнера соответствует стандартным алгоритмам изготовления конструкций и не должна иметь острых краев, трещин и царапин.

Заливка понтиков осуществляется путем нанесения бонда на его внутреннюю поверхность. Затем этот тонкий слой композита, выбранный в соответствии с цветом зубов пациента, 30 сек засвечивается ультрафиолетовой лампой.

## 2.6 Клинико-диагностический прием

### 2.6.1 Фотопротокол и диагностика

Фотопротокол и диагностика проводились в соответствии с требованиями, прописанным в анкете Flexiligner, представленной на рисунках 4-8.

The screenshot displays the 'Flexiligner - личный кабинет врача' (Flexiligner - doctor's personal cabinet) interface. At the top, the user is identified as 'Рыбаков Александр' (Rybakov Alexander). The main navigation bar includes 'Пациенты' (Patients), 'Мой профиль' (My profile), 'Мои клиники' (My clinics), 'Счета' (Accounts), 'Заборы/Доставки' (Collections/Deliveries), and 'Мероприятия' (Events).

The patient list shows 'Иванов' (Ivanov) selected. The patient's details are:
 

- Кейс №: —
- Категория: —
- ФИО: Иванов Иван Иванович
- Создан: —
- Статус:  Ожидает Ваших действий

A 'Подсказка' (Tip) box contains instructions:
 

- Внесите все необходимые данные о пациенте.
- Отправьте заявку в работу или сохраните чтобы вернуться к ней позднее.

 Buttons for 'Сохранить' (Save) and 'Сохранить и отправить' (Save and send) are present.

The 'Основное лечение' (Main treatment) flowchart includes: Заполнение данными (Data entry), Обработка заявки (Request processing), Сбор информации (Information collection), Диагностика (Diagnosis), Производство (Production), Лечение (Treatment), and Завершение (Completion). A 'Запросить забор слепков' (Request for impressions) button is also visible.

Below the flowchart, there is a section for 'Здесь вы можете создавать заметки по пациенту' (Here you can create notes for the patient) with a plus icon.

The 'Исходные данные' (Initial data) section is divided into:
 

- Данные пациента** (Patient data):
  - Фамилия \*: Иванов
  - Имя \*: Иван
  - Отчество: Иванович
  - Дата рождения \*: 01.01.2001
  - Пол:  муж.  жен.
- Оплата и адрес** (Payment and address):
  - Клиника  Пациент
  - Клиника: [dropdown]
  - Юр. название: [text input]
  - Адрес: [text input]
  - Адрес доставки: [dropdown]
  - Промокоды: [button: Активировать промокод]

The 'Основное лечение' (Main treatment) section features 'Обязательные фотографии и снимки' (Mandatory photos and X-rays) with icons for:
 

- В профиль (Profile view)
- Анфас с «Зимма» (Front view with 'Zimma' device)
- Анфас с улыбкой (Front view with smile)
- Анфас с ретрактором с открытым ртом (Front view with retractor, mouth open)
- Окклюзионный вид верхнего зубного ряда (Occlusal view of upper dental arch)
- Окклюзионный вид нижнего зубного ряда (Occlusal view of lower dental arch)
- Латеральный вид справа (Lateral view from right)
- Фронтальный вид (Frontal view)
- Латеральный вид слева (Lateral view from left)
- ОПГ (OPG - panoramic X-ray)

Below this, there is a section for 'Дополнительные фото и изображения' (Additional photos and images) with a camera icon.

Рисунок 4 - Анкета Flexiligner

План лечения

### Текущая ситуация в полости рта:

1. Сужение:	Верхняя челюсть: <input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет	Нижняя челюсть: <input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет
2. Скуеность:	Верхняя челюсть: <input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет	Нижняя челюсть: <input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет
3. Перекрестное соотношение:	<input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет	<input type="checkbox"/> в переднем отделе <input type="checkbox"/> в боковом отделе <input type="checkbox"/> односторонний <input type="checkbox"/> двусторонний
4. Соотношение клыков по Энгло:	СПРАВА: <input type="radio"/> I класс <input type="radio"/> II класс <input type="radio"/> III класс	СЛЕВА: <input type="radio"/> I класс <input type="radio"/> II класс <input type="radio"/> III класс
5. Соотношение 1-ых моляров по Энгло:	СПРАВА: <input type="radio"/> I класс <input type="radio"/> II класс <input type="radio"/> III класс	СЛЕВА: <input type="radio"/> I класс <input type="radio"/> II класс <input type="radio"/> III класс
6. Соотношение резцов по вертикали:	<input type="radio"/> нейтральный (1/3) <input type="radio"/> глубокий <input type="radio"/> открытый <input type="radio"/> прямой	
7. Смещение центральной линии:	<input type="radio"/> да <input type="radio"/> нет	<input type="checkbox"/> на верхней челюсти <input type="checkbox"/> на нижней челюсти
8. Есть ли наклон окклюзионной плоскости (Наклон относительно эрачковой линии):	<input type="radio"/> Да <input type="radio"/> Нет	
9. Есть ли пародонтологический статус:	<input type="radio"/> Да <input type="radio"/> Нет	Резорбция костной ткани более 1/3 длины корня, но предполагает корпусные перемещения.
10. Особенности:	Выберите особенность и отметьте соответствующие зубы: <input type="checkbox"/> Зуб удалён <input type="checkbox"/> - Имплантат <input type="checkbox"/> - Винир/коронка	

### План лечения:

Пожалуйста, внимательно относитесь к процедуре заполнения анкеты! Отмеченные вами ниже клинические предпочтения будут использоваться для формирования технического задания и изготовления 3d-диагностики.

11. Лечим зубные дуги:	<input type="radio"/> Обе <input type="radio"/> Верхнюю <input type="radio"/> Нижнюю			
12. Центральная линия:	<p>Верхняя центральная линия:</p> <input type="radio"/> не менять <input type="radio"/> сдвинуть вправо <input type="radio"/> сдвинуть влево	<p>Оцените фотографии пациента, если при открывании рта (фото с ретракторами и широко открытым ртом, Зима) центр нижней челюсти выравнивается с верхним, то можно предположить, что у пациента есть функционально смещение нижней челюсти и корпусно-центр альную линию на нижней челюсти смещать НЕ нужно.</p>	<p>Нижняя центральная линия:</p> <input type="radio"/> не менять <input type="radio"/> сдвинуть вправо <input type="radio"/> сдвинуть влево	<p>За счёт:</p> <input type="checkbox"/> смощения зубов (корпусно или актуализации) <input type="checkbox"/> изменение положения НЧ (отметить в пункте 19)

Рисунок 5 - Анкета Flexiligner

13. Устранить скученность за счёт:

расширения  
 сепарации  
 апрайтинга  
 дистализации  
 удаления  
 протрузии

14. Перекрестное соотношение боковых зубов:

отсутствует  
 не менять  
 скорректировать

Гиперкоррекция движений  
 Эластические межчелюстные тяги (кнопка-кнопка)  
 Эластические межчелюстные тяги (кнопка-МИ)

15. Расширение:

не делать расширение  
 3-3 (в области клыков)  
 5-5 (в области клыков и премоляров)  
 6-6 (в области клыков, премоляров и 1-ых моляров)  
 7-7 (по всей дуге)

За счёт

Верхний зубной ряд:  торж  корпусно  
Нижний зубной ряд:  торж  корпусно

Объём расширения всей зубной дуги

1-2 мм.  
 2-3 мм.  
 3-4 мм.

16. Сепарации:

при возможности, отложить начало проведения сепараций до этапа нивелирования (раунд триппинг)  
 применить сепарации с 1 шага  
 во фронтальном отделе  
 в области премоляров  
 в области моляров  
 в области искусственных коронок  
 в области молочных зубов (при их наличии)  
 на усмотрение лаборатории

17. Допускаете ли Вы использование микроимплантатов (МИ) в данном кейсе:

Да  
 Нет  
 По рекомендации лаборатории  
(Какие локализации чаще используете в практике)

18. 8-ые зубы:

**Внимание! По умолчанию недистопированные 8 зубы и зубы, находящиеся в контакте покрываются элайнером!**

Планируется удаление <input type="radio"/>		<input type="radio"/> Планируется удаление
Не планируется удаление <input type="radio"/>		<input type="radio"/> Не планируется удаление
Удаление по рекомендации лаборатории <input type="radio"/>	1.8	2.8 <input type="radio"/> Удаление по рекомендации лаборатории
Планируется удаление <input type="radio"/>	4.8	3.8 <input type="radio"/> Планируется удаление
Не планируется удаление <input type="radio"/>		<input type="radio"/> Не планируется удаление
Удаление по рекомендации лаборатории <input type="radio"/>		<input type="radio"/> Удаление по рекомендации лаборатории

19. Коррекция в сагиттальной плоскости:

Не менять  
 Ортогнатическая хирургия  
 Предположение возможного смещения нижней челюсти Байт-Джамп (конструктивный прикус - лаборатория меняет положение нижней челюсти по отношению к верхней до начала лечения, ориентируясь на данные, которые вы предоставили: **обязательные фотографии, скриншоты суставов**)

**Внимание! Использование межчелюстных тяг и удаление 8 зубов обязательно!**

использовать регистрат прикуса (вы определили новое предполагаемое положение нижней челюсти любым доступным в клинике способом)  
 переднее смещение (класс II\1, II\2)  
 боковое смещение (боковое смещение нижней челюсти с коррекцией центральной линии при симметричных классах смыкания)  
 смещение с ротацией (смещение нижней челюсти с коррекцией центральной линии при асимметричных классах смыкания)  
 вертикальное смещение (коррекция высоты прикуса за счёт смещения нижней челюсти в результате экструзии/интрузии зубов при изменении торка или апрайте)

Дистализация

**Внимание! Выбирая данный пункт Вы соглашаетесь на удаление зубов мудрости в сегменте дистализации!**

- последовательная (до 2мм + межчелюстные тяги) в секторах: 

1	<input type="checkbox"/>	2
4	<input type="checkbox"/>	3
- смешанная/последовательная (от 3мм + межчелюстные тяги + МИ) в секторах: 

1	<input type="checkbox"/>	2
4	<input type="checkbox"/>	3
- групповая по Вергаре (межчелюстные тяги + МИ) в секторах: 

1	<input type="checkbox"/>	2
4	<input type="checkbox"/>	3

в IZC (подскуловой гребень)  
 в Buccal Shelf (щёчный выступ)

Рисунок 6 - Анкета Flexiligner

Мезиализация

- последовательная (до 2мм + межчелюстные тяги) в секторах: 1  2  
4  3
- закрытие постэкстракционных промежутков (power arm + MI или power arm + power arm) в секторах: 1  2  
4  3  
*(обязательно оценить соотношение коронки с гайморовой пазухой и объем ануляции коронки, объем перевешивания не более 5 мм)*
- групповая (межчелюстные тяги + MI) в секторах: 1  2  
4  3

20. Планируете ли замену/установку:

Выберите особенность и отметьте соответствующие зубы:

Планируется удаление ? Удаление по рекомендации лаборатории

Не перемещать зуб  Не ставить аттачменты

- пломба  - имплантат  - винир/коронка

Если планируется поднятие высоты прикуса в боковых отделах или замена объемных пломб, отметьте их на схеме. Мы оставим место для будущих реставраций.

21. При несоответствии ширины резцов и клыков по Болтону предпочтительнее:

оставить промежутки дистальнее боковых резцов  
 оставить промежутки дистальнее и мезиальнее боковых резцов  
 сепарация антагонистов  
 при сепарации нижних резцов более 0,3 мм раскрыть тремы в области верхних боковых резцов

22. Выравнивание фронтальных зубов:

Выравнивание фронтальных верхних зубов:

по режущему краю  
 Боковые резцы на одном уровне с центральными  
 Боковые резцы на 0,5 мм короче центральных  
 по десневому краю

Взять зубы за эталон:

Выравнивание фронтальных нижних зубов:

по режущему краю  
 по десневому краю

Взять зубы за эталон:

Выравнивание по десневому краю подразумевает, что режущие края зубов могут быть на разном уровне и планируется дальнейшая реставрация в этой области. ?

23. Соотношение резцов по сагиттали:

Верхняя челюсть:

не менять  
 менять  
 корпусно (ретракция/протракция)  
 торк (ретрузия/протрузия)

Нижняя челюсть:

не менять  
 менять  
 корпусно (ретракция/протракция)  
 торк (ретрузия/протрузия)

24. Коррекция окклюзионной плоскости (кривая Шпее, кант):

заполнить схему  
 на усмотрение лаборатории

Ингрузия  Экструзия

Рисунок 7 - Анкета Flexiligner




25. Обрезка элайнеров:		<input type="radio"/> высокая *	<input type="radio"/> комбинированная	<input type="radio"/> низкая
				
		при незначительных изменениях пародонта	при локальных изменениях пародонта	при генерализованных изменениях пародонта
		* Рекомендовано лабораторией	Укажите зону низкой обработки (номера зубов):	
26. Применить виртуальную эластичную цепочку (Уплотнение аппроксимальных контактов):		Гиперкоррекция в случаях лечения с закрытием трем:		
		<input type="radio"/> нет		
		<input type="radio"/> да, 3-3		
		<input type="radio"/> да, 6-6		
27. Последовательность перемещения зубов:		<input type="radio"/> по протоколам лаборатории		
		<input type="radio"/> напишите свои предпочтения:		
		<input type="text"/>		

Рисунок 8 - Анкета Flexiligner

Файлы сканирования зубных рядов пациента загружаются в форму заказа для оценки специалистами лаборатории. Затем из лаборатории сообщают о надлежащем либо ненадлежащем качестве трехмерных моделей.

В анкету вносятся данные пациента: фамилия, имя, отчество и дата рождения.

В форму в раздел диагностики загружаются фотографии, выполненные во время клинического приема, по протоколу, указанному в анкете: фотография в профиль, фотография для определения экспозиции резцов - анфас с «Эмма», анфас с улыбкой, анфас с ретрактором и открытым ртом, интраоральные фотографии – окклюзионный вид верхнего и нижнего зубного ряда, латеральный вид окклюзии слева, справа и фронтальный вид, ортопантограмма.

Индивидуальный план лечения заполняется в соответствии с целями и задачами для каждого конкретного пациента по представленному в анкете протоколу, где следует отметить указанные пункты:

#### **Описание текущей ситуации в полости рта:**

1. Наличие сужения на верхней и/или нижней челюсти
2. Скученность на верхней и/или нижней челюсти



3. Наличие перекрестного соотношения
4. Соотношение клыков по Энгля:  
  
Справа: I класс, II класс III класс  
  
Слева: I класс, II класс, III класс
5. Соотношение 1-ых моляров по Энгля:  
  
Справа: I класс, II класс, III класс  
  
Слева: I класс, II класс, III класс
6. Соотношение резцов по вертикали: нейтральный (1/3), глубокий, открытый, прямой
7. Наличие смещения центральной линии
8. Наклон окклюзионной плоскости (Наклон относительно зрачков линии)
9. Наличие пародонтологического статуса
10. Особенности лечения: зуб удален; установлен имплант; винир/коронка

**План лечения:**

11. На какой челюсти будет проводиться лечение, на верхней, нижней или обеих
12. Центральная линия:  
  
Верхняя центральная линия: не менять, сдвинуть вправо или влево  
  
Нижняя центральная линия: не менять, сдвинуть вправо или влево
13. Устранить скученность за счет: расширения, сепарации, апрайтинга, дистализации, удаления, протрузии
14. Перекрестное соотношение боковых зубов: отсутствует, не менять, скорректировать
15. Расширение:
  - не делать расширение

- 3-3 (в области клыков)
- 5-5 (в области клыков и премоляров)
- 6-6 (в области клыков и премоляров и 1-ых моляров)
- 7-7 (по всей дуге)

16. Сепарации:

- при возможности, отложить начало проведения сепарации до этапа нивелирования (раунд триппинг)
- применить сепарации с 1-го шага
- во фронтальном отделе
- в области премоляров
- в области моляров
- в области искусственных коронок
- в области молочных зубов (при их наличии)
- на усмотрение лаборатории

17. Допускаете ли Вы использование микроимплантов (МИ) в данном кейсе:

- да
- нет
- по рекомендации лаборатории

18. 8-ые зубы – 1.8; 2.8; 3.8; 4.8:

По умолчанию недистопированные 8 зубы и зубы, находящиеся в контакте, покрываются элайнерами!

- планируется удаление
- не планируется удаление
- удаление по рекомендации лаборатории

19. Коррекция в сагитальной плоскости:

- Не менять
- Ортогнатическая хирургия

- Предложение возможного смещения нижней челюсти Байт-Джамп (конструктивный прикус – лаборатория меняет положение нижней челюсти по отношению к верхней до начала лечения, ориентируясь на данные, которые вы предоставили: обязательные фотографии, скриншоты суставов)

Использование межчелюстных тяг и удаление 8 зубов обязательно.

- использовать регистрат прикуса (вы определили новое положение нижней челюсти любым доступным в клинике способом)
- переднее смещение (класс II/1, II/2)
- боковое смещение (боковое смещение нижней челюсти с коррекцией центральной линии при симметричных классах смыкания)
- смещение с ротацией (смещение нижней челюсти с коррекцией центральной линии при асимметричных классах смыкания)
- вертикальное смещение (коррекция высоты прикуса за счет смещения нижней челюсти в результате экструзии/интрузии зубов при изменении торка или апрайте)
- Дистализация
  - Последовательная (до 2 мм + межчелюстные тяги) в секторах
  - Смешанная/последовательная (от 3мм + межчелюстные тяги + МИ) в секторах
    - в IZC (подскуловой гребень)
    - в Buccal Shelf (щечный выступ)
- Мезиализация
  - Последовательная (до 2мм + межчелюстные тяги) в секторах
  - Закрытие постэкстракционных промежутков (power arm + МИ или power arm) (обязательно оценить соотношение корней с

гайморовой пазухой и объемом ангуляции корней, объем перемещения не более 5 мм)

• Групповая межчелюстные тяги + МИ) в секторах

20. Планируется ли замена/установка: Выбираются особенности и отмечаются соответствующие зубы на схеме:

- Планируется удаление
- Удаление по рекомендации лаборатории
- Не перемещать зуб
- Не ставить аттачменты
- Пломба
- Имплант
- Винир/коронка

Если планируется поднятие высоты прикуса в боковых отделах или замена объемных пломб, отметить их на схеме. Лаборатория оставит место для бедующих реставраций.

21. При несоответствии ширины резцов и клыков по Болтону предпочтительнее:

- оставить промежутки дистальнее боковых резцов
- оставить промежутки дистальнее и мезиальнее боковых резцов
- сепарация антагонистов
- при сепарации нижних резцов более 0,3 мм раскрыт тремы в области верхних боковых резцов

22. Выравнивание фронтальных зубов и какой зуб берется за эталон:

- Выравнивание фронтальных верхних зубов: по режущему или десневому краю

- Выравнивание фронтальных нижних зубов: по режущему или десневому краю

Выравнивание по десневому краю подразумевает, что режущие края зубов могут быть на разном уровне и планируется дальнейшая реставрация в этой области.

23. Изменение соотношения резцов по сагитали:

Верхняя челюсть: менять / не менять

Нижняя челюсть: менять / не менять

24. Заполнение схемы коррекции окклюзионной плоскости (кривая Шпее, кант) или на усмотрение лаборатории

25. Обрезка элайнеров:

- Высокая при незначительных изменениях пародонта
- Комбинированная при локальных изменениях пародонта
- Низкая при генерализованных изменениях пародонта

26. Применить виртуальную эластичную цепочку (Уплотнение аппроксимальных контактов): Гиперкоррекция в случаях лечения с закрытием трем: нет, 3-3, 6-6

- Последовательность перемещения зубов: по протоколам лаборатории или по предпочтению врача-ортодонта

### **2.6.2 Оценка наличия воспаления СОПР**

Йодная проба - это метод диагностики и оценки состояния десен, основанный на способности йод-йодидно-калиевого раствора окрашивать участки скопления гликогена. При этом в участках глубокого поражения соединительной ткани, где гликогена содержится больше всего, происходит окрашивание в интенсивный синий цвет. Это позволяет визуально определить степень воспаления десен.

Для проведения пробы десна смазывается раствором и оценивается степень окраски. Участки интенсивного потемнения десны фиксируются в карте обследования.

Для объективизации результатов используется шкала баллов:

Окраска десневых сосочков - 2 балла;

Окраска десневого края - 4 балла;

Окраска альвеолярной десны - 8 баллов.

Йодное число - это сумма баллов, полученных при оценке состояния десен у каждого зуба, разделенная на число обследованных зубов.

Оценка значений йодного числа Свракова:

- Слабовыраженный процесс воспаления:
  - Индекс РМА менее 2,3 баллов свидетельствует о слабовыраженном воспалении тканей пародонта.
  - Воспалительные изменения могут быть незначительными и не вызывать выраженных клинических симптомов.
- Умеренно выраженный процесс воспаления:
  - Индекс РМА от 2,3 до 5,0 баллов свидетельствует об умеренно выраженном воспалении тканей пародонта.
  - Воспалительные изменения могут быть более выраженными и приводить к развитию клинических симптомов, таких как кровоточивость десен, отек, гиперемия.
- Интенсивный воспалительный процесс:
  - Индекс РМА от 5,1 до 8,0 баллов свидетельствует об интенсивном воспалении тканей пародонта.

- Воспалительные изменения могут быть выраженными и приводить к развитию деструктивных процессов в тканях пародонта, таких как гингивит, пародонтит.

Папиллярно-маргинально-альвеолярный индекс (РМА) - это количественная оценка тяжести воспалительного процесса в тканях пародонта. Индекс может быть выражен в виде процента от количества зубов, у которых наблюдается воспаление.

Для определения гингивального индекса РМА, десна делится на три области:

Папиллярную (Р), маргинальную (М), и альвеолярную (А).

Для количественной оценки воспалительного процесса в деснах используется шкала баллов.

1 балл - воспаление сосочка;

2 балла - воспаление края десны;

3 балла - воспаление альвеолярной десны.

Оценка проводится у каждого зуба.

$$РМА = \frac{[(\sum \text{оценка в баллах}) \times 100\%]}{3 \times (\text{число зубов})}$$

Значения индекса до 30% означают незначительную тяжесть воспалительного процесса; 30-60% - среднюю тяжесть гингивита; более 60% - тяжелая степень патологического процесса

Перед началом ортодонтического лечения необходимо удостовериться в начальном статусе ортодонтического пациента и его подготовленности к лечению. В большинстве случаев, если гигиена неудовлетворительна, пациента обучают гигиене полости рта и назначают следующий визит для проверки индексов гигиены. При плохой гигиене полости рта во время ортодонтического лечения будут возникать осложнения, связанные с воспалительными процессами СОПР. При наличии воспаления СОПР неизбежно возникнут ошибки при определении

биотипа СОПР перед началом ортодонтического лечения и, соответственно, выбора тактики лечения.



### Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов

Во время клинического приема после осмотра пациента выполняется стандартный фотопротокол. Затем обязательно проводится профессиональная гигиена полости рта. Только после этого можно приступить к сканированию зубных рядов пациента. В раздел учета пациентов в программном обеспечении сканера вводятся данные пациента. Дата и время сканирования создаются автоматически. При создании рабочей модели зубных рядов проведение профгигиены полости рта является обязательным требованием. В противном случае, при наличии мягкого налета цифровая поверхность зубов получается неровной, что в будущем негативно скажется на прилегании элайнеров. На представленном примере цифровой диагностической модели можно увидеть разницу в степени неровности отображения поверхности зубной эмали (рисунок 9, 10).

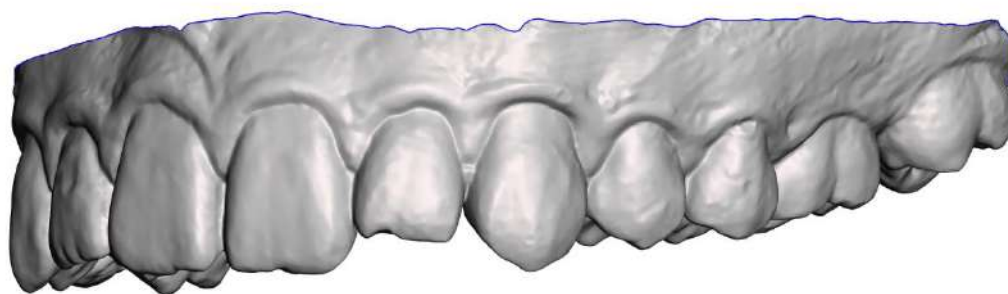


Рисунок 9 - Трехмерная модель верхнего зубного ряда без проведения гигиены полости рта

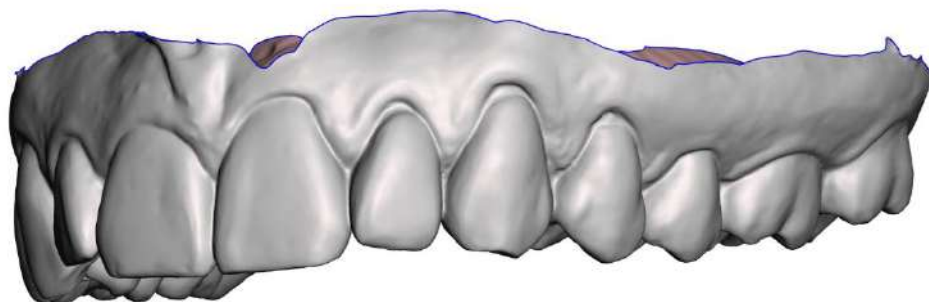


Рисунок 10 - Трехмерная модель верхнего зубного ряда после проведения гигиены полости рта

После проведения полной санации полости рта и выполнения профессиональной гигиены в соответствии с протоколом осуществляется сканирование зубных рядов верхней и нижней челюсти. Сканирование проводится, начиная с дистальной поверхности коренных зубов, при этом наконечник направлен под углом 40-50 градусов с язычной/небной поверхности зубов как показано на рисунке 11.

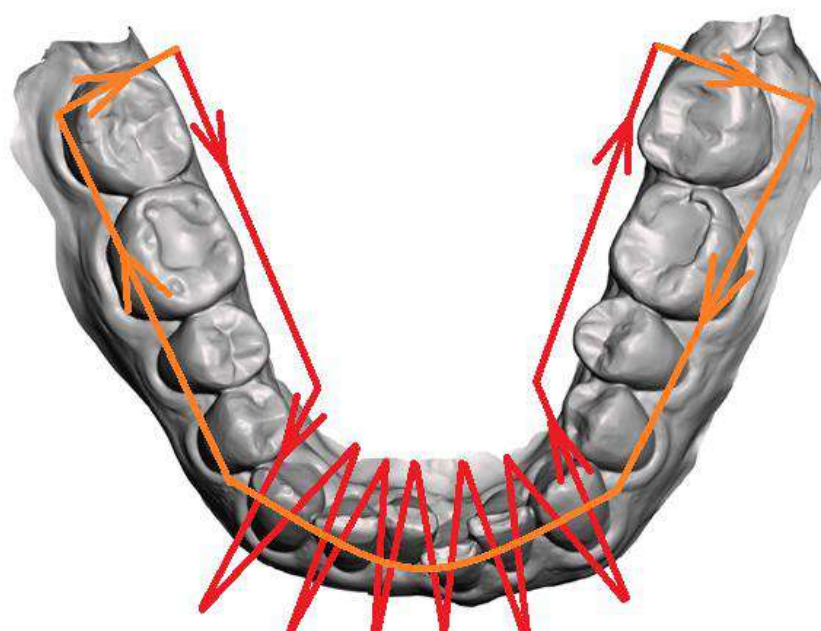


Рисунок 11 - Алгоритм проведения сканирования интраоральным сканером

После получения моделей зубных рядов верхней и нижней челюсти необходимо получить модель зубных рядов в центральной окклюзии. Далее следует объединить по этим поверхностям модели зубных рядов верхней и нижней челюсти (рисунок 12).

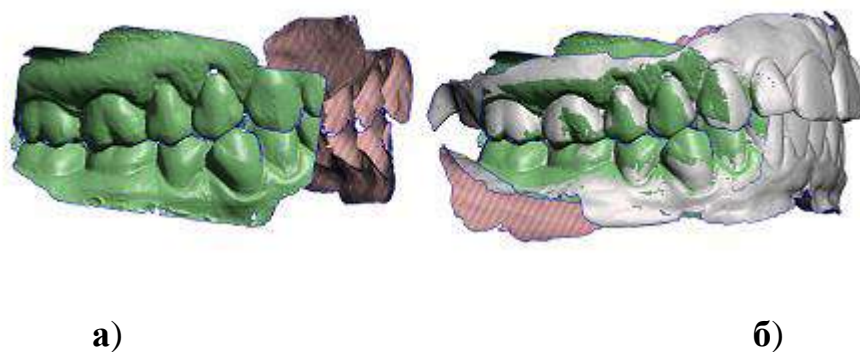


Рисунок 12 - Трехмерная модель в центральной окклюзии (а), модели верхнего и нижнего зубного ряда, наложенные на окклюзионную модель (б)

После сопоставления необходимо провести цифровую обработку моделей и удалить артефакты сканирования, которые не были удалены искусственным интеллектом программного обеспечения сканера (рисунок 13).

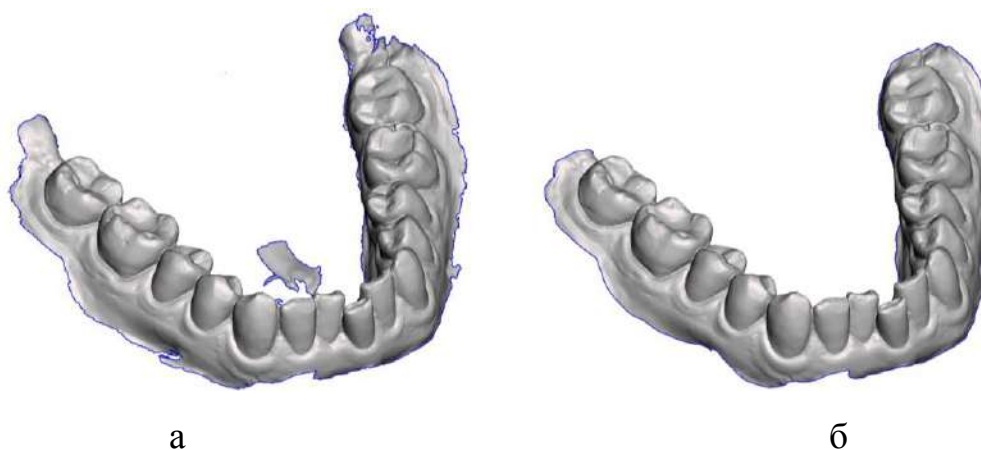


Рисунок 13 - Удаление артефактов на трехмерной модели зубного ряда до (а) и после (б)

Затем для планирования ортодонтического лечения в программном обеспечении выставляются окклюзионные плоскости, и добавляются виртуальные основания моделей челюстей (рисунок 14).

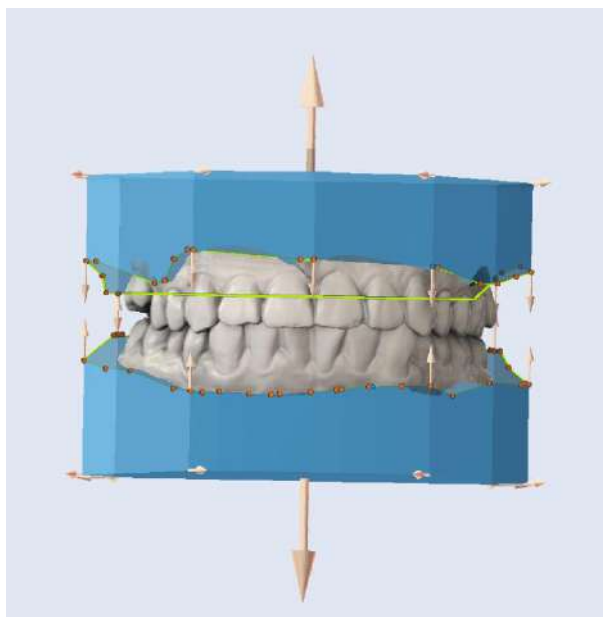


Рисунок 14 - Добавление основания на виртуальной модели зубных рядов

После обработки моделей проводится сегментирование зубов ручным способом или автоматическим способом при помощи ИИ. Добавляются модели корней зубов при условии, что есть в наличии сегментированные данные КТ. Корни сопоставляются с сегментированными моделями отдельных зубов. При отсутствии сегментированных моделей корней зубов, каждому зубу выставляются оси (рисунок 15).

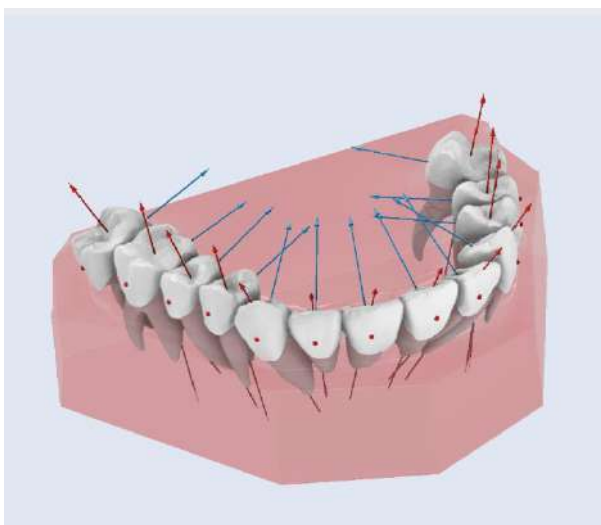


Рисунок 15 – Ориентация виртуальных осей каждого зуба

После того как модели зубных рядов получены, составляется план лечения с разбиением на этапы посредством перемещения зубов в запланированное положение (рисунок 16).

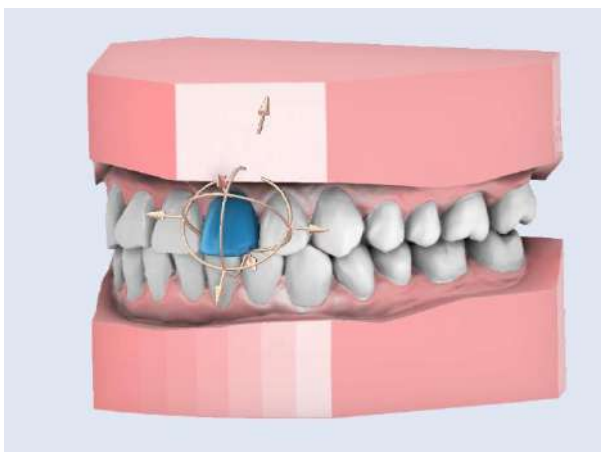


Рисунок 16 - Манипулятор выделенного зуба для перемещения в заданное положение

### **3.1.1 Протокол получения трехмерных моделей зубных рядов**

После проведения полной санации полости рта и выполнения профессиональной гигиены сканирование зубных рядов верхней и нижней челюсти выполняется в соответствии с протоколом, рекомендованным производителем.

Трехмерные модели зубных рядов обрабатываются вручную, и проводится визуальный контроль на наличие артефактов, которые необходимо удалить.

После обработки моделей проводится сегментирование зубов ручным способом или автоматическим способом при помощи ИИ. Отдельные сегментированные модели каждого зуба сопоставляются с моделями корней зубов из КТ. Если моделей корней зубов нет, то выставляются оси каждого зуба и моделируются виртуальные модели корней зубов.

### **3.2 Сегментация данных КТ**

Существуют критерии отбора данных для сегментации: КТ верхней и нижней челюсти размером 8x12, 15x17 и трехмерные модели зубных рядов, полученные интраоральным сканером, должны быть с разницей проведения исследований не более четырех месяцев при отсутствии воспалительных процессов СОПР.

В данном исследовании сегментация костных структур и отдельных зубов проводилась различными методами с целью получения наиболее стабильного результата. Одним из критериев была доступность метода в повседневной практике врача.

Сегментирование при помощи ИИ (искусственного интеллекта) или НС (нейронных сетей) в дальнейшем было использовано для составления цифрового плана лечения пациентов и прецизионного контроля положения корней зубов (рисунок 17). В данной работе рассмотрены следующие варианты сегментации костных структур лицевого скелета и отдельных зубов:

1. Ручная сегментация.
2. Ручная островная сегментация.
3. Алгоритм сегментации по водоразделам (WaterShed).
4. Автоматическая при помощи ИИ (НС).

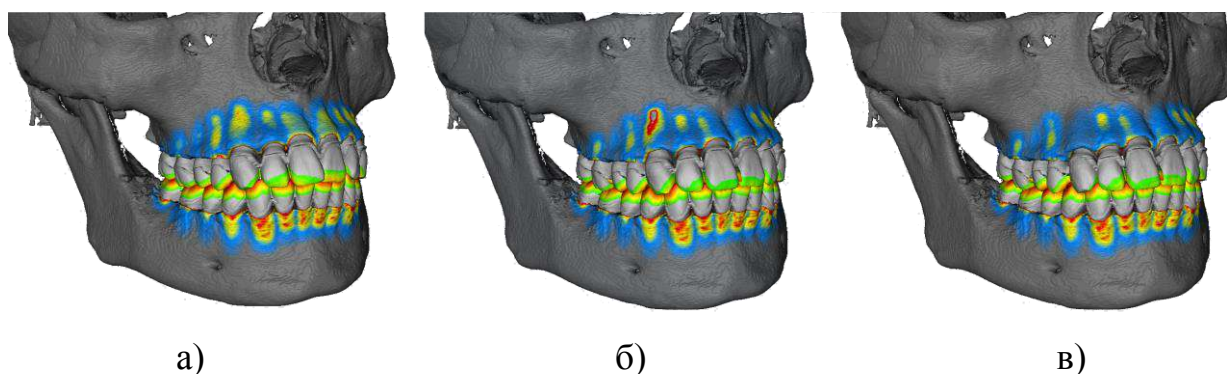


Рисунок 17 - (а) Перед началом лечения; (б) без коррекции положения корней зубов; (в) после коррекции положения корней зубов

В этом списке следует особо отметить самый современный метод сегментации с использованием ИИ. Однако он отлично будет работать, если проведена подготовительная работа, то есть модель сегментации уже обучена. Данный метод дает наиболее стабильный результат в исследованиях, так как меньше всего зависит от человеческого фактора в обработке входных данных.

Клиницистам доступен каждый из методов, однако следует учитывать критерии обработки и получения данных:

1. Ручной метод занимает много времени и возможны многочисленные ошибки.
2. Ручная островная сегментация – относительно быстрый метод, требующий традиционной обработки после выделения контрастных островов масок (рисунок 65, 66).

3. Метод сегментации по морфологическим водоразделам – наиболее быстрый из возможных методов, но без возможности сегментации отдельных зубов.
4. При помощи ИИ, при наличии обученной модели, сегментация происходит в автоматическом режиме и занимает несколько секунд. При отсутствии обученной модели, обучение занимает продолжительное время, однако оно намного меньше, чем при работе ручным методом.

### **3.2.1 Сегментация данных КТ ручным методом**

Для ручного метода первым этапом является обработка КЛКТ и сегментация костных структур по шкале Хаунсфилда для создания трехмерной модели без использования фильтров и модификаций изображений. Каждый набор данных в формате dicom был обработан в программном обеспечении Mimics inPrint 2.0 и Mimics PRO Plan CMF 3.0 [20, 51].

Маски каждого слоя дорабатывались вручную для обеспечения максимальной точности в дальнейшей работе. Получившиеся трехмерные модели подвергались сглаживанию с компенсацией на сжатие масок, а их контуры оценивались на возможные ошибки во время обработки (рисунок 18).



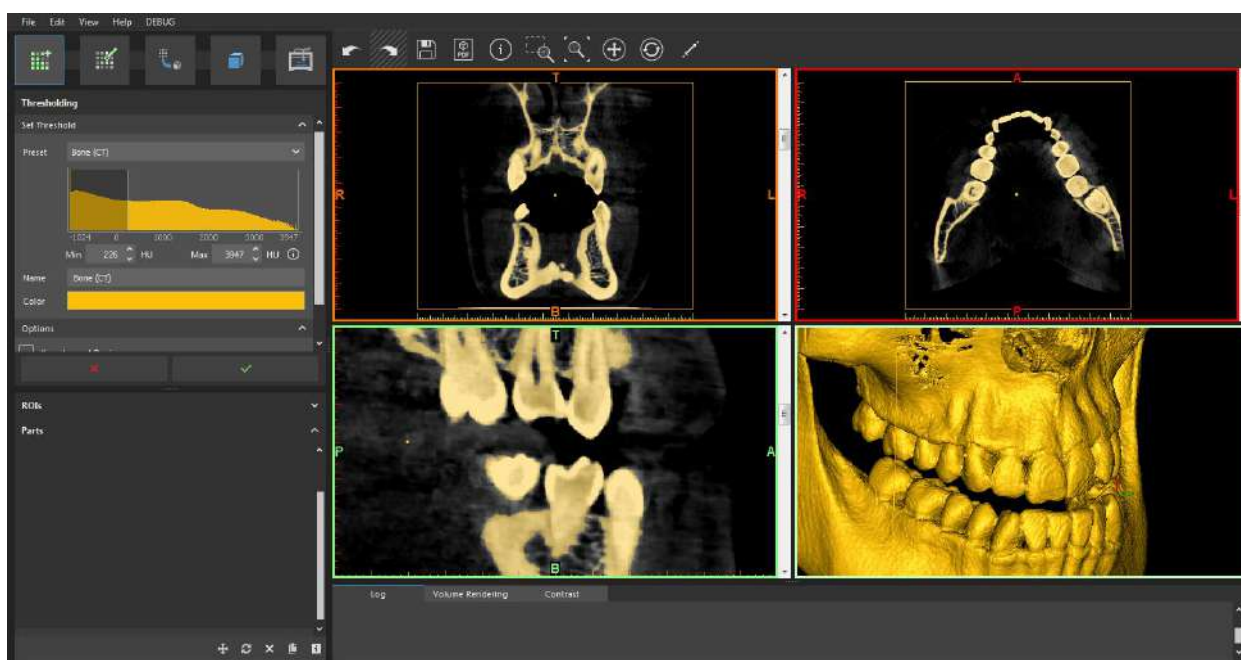


Рисунок 18 - Ручная обработка КЛКТ методом пороговых значений на шкале Хаунсфилда

### **Обработка, сглаживание, совмещение.**

Трёхмерные модели верхней и нижней челюсти после обработки были разделены на отдельные модели (рисунок 19). Ключевым пунктом в подготовке данных было совмещение отсканированных моделей зубных рядов с полученными моделями костных структур из КТ. В связи с тем, что модели только частично совпадали по геометрии (общая часть – эмаль зубов, которая подвергалась отдельной тщательной ручной обработке), а была и несовпадающая часть в виде костной ткани на одном наборе моделей и слизистой на втором наборе, стандартные инструменты глобального или локального совмещения зачастую давали погрешность сопоставления.



Рисунок 19 - Разделение трехмерной модели на верхнюю и нижнюю челюсть

Контрольный анализ, выполненный в программном обеспечении Geomagic Control X (3D Systems, Rock Hill, SC), показал, что «лишние» данные в виде неодинаковых частей моделей (корни зубов, костная ткань и слизистая полости рта) во время сопоставления дают большую погрешность в методике анализа и могут привести к неправильным результатам (рисунок 20, 21).

Для работы использовался инструмент, исключаящий ошибки сопоставления и работающий по принципу «кисть», который выделяет части моделей с различными геометриями, участвующими в сопоставлении. Сравнительный анализ (рисунок 22 - 26) показывает сопоставление результатов, полученных методом предварительного выравнивания с автоматическим наложением и методом ручной маркировки. Результаты визуально оцениваются на срезах начального КТ с контурными линиями трехмерных моделей. Красный цвет моделей и контуров соответствует сопоставлению с использованием инструмента

«кисть», голубым цветом обозначены модели, сопоставленные автоматическим методом глобальной или локальной регистрации в пределах минимального значения 1 мм с предварительной ориентировочной постановкой моделей. Желтым цветом обозначены модели, полученные путем сегментирования по шкале Хаунсфилда и дополнительной ручной обработкой. Таким образом, проведенный анализ показал, что результат, полученный методом автоматического выравнивания, отличается от результата, полученного выборочным методом с использованием инструмента «кисть».

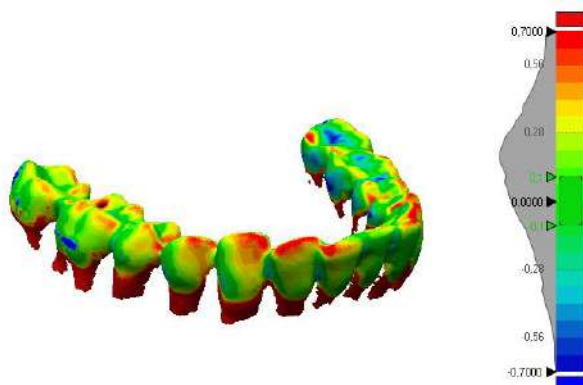


Рисунок 20 - Автоматическое сопоставление сегментированных моделей из КЛКТ и отсканированных моделей зубных рядов

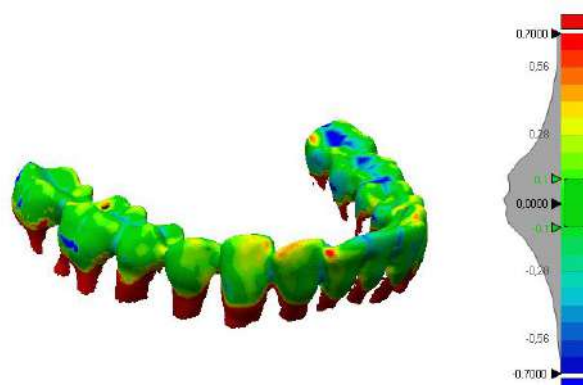


Рисунок 21 - Маркерное сопоставление сегментированных моделей из КЛКТ и отсканированных моделей зубных рядов

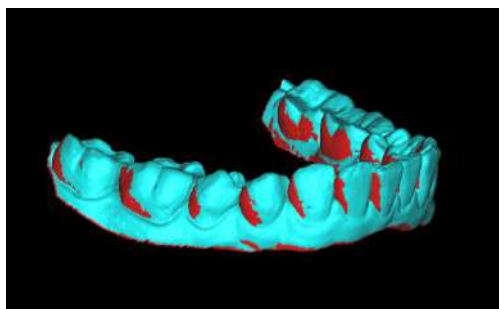


Рисунок 22 - Трехмерное сравнение положения зубных рядов в автоматическом и ручном режиме при помощи маркировки областей интереса. Голубой цвет – автоматическое выравнивание, красный цвет – ручное

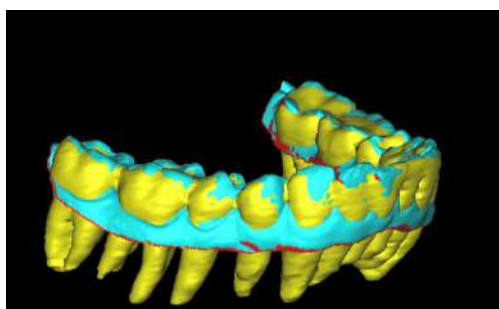


Рисунок 24 - Трехмерное сравнение положения зубных рядов в автоматическом и ручном режиме при помощи маркировки областей интереса с положением сегментированных моделей зубов из КТ. Голубой цвет – автоматическое выравнивание, красный цвет – ручное, желтый цвет – сегментированная модель зубов из

КТ

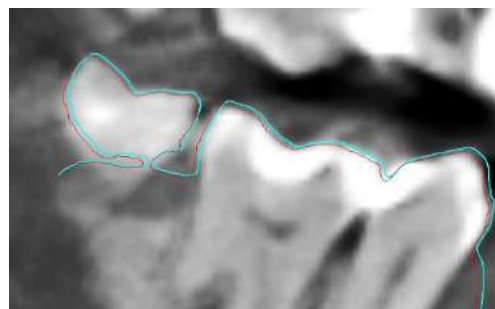


Рисунок 23 - Контурное сравнение положения зубных рядов в автоматическом и ручном режиме при помощи маркировки областей интереса. Голубой цвет – автоматическое выравнивание, красный цвет – ручное

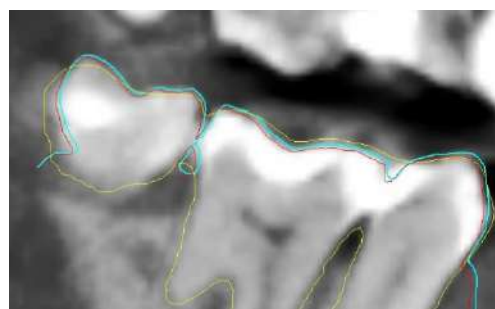


Рисунок 25 - Контурное сравнение положения зубных рядов в автоматическом и ручном режиме при помощи маркировки областей интереса с положением сегментированных моделей зубов из КТ. Голубой цвет – автоматическое выравнивание, красный цвет – ручное, желтый цвет – сегментированная модель зубов из КТ

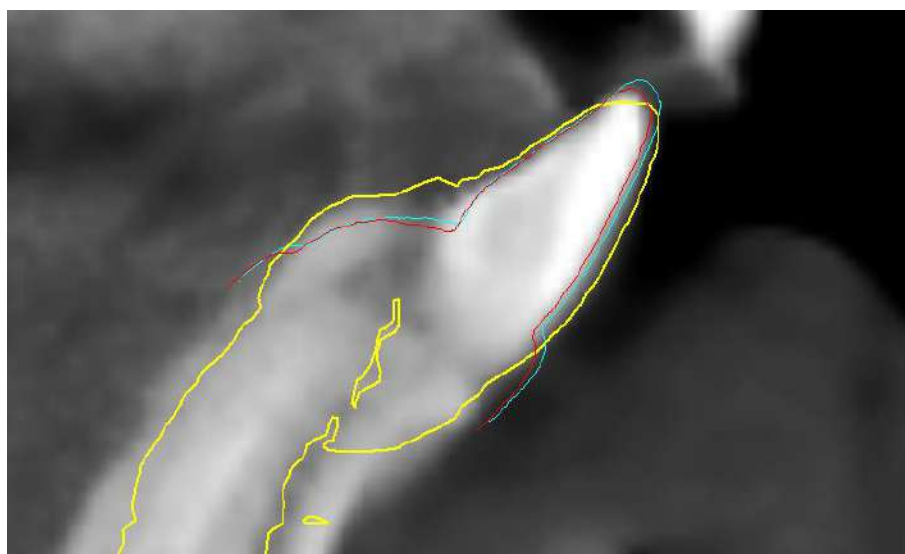


Рисунок 26 - Контурное сравнение положения зубных рядов в автоматическом и ручном режиме при помощи маркировки областей интереса с положением сегментированных моделей зубов из КТ. Голубой цвет – автоматическое выравнивание, красный цвет – ручное, желтый цвет – сегментированная модель зубов из КТ

В программном обеспечении Mimics Proplan CMF 3.0 инструментом «кисть» выделяются области совмещения и производится перемещение отсканированных трехмерных моделей зубных рядов (рисунок 27, 28).



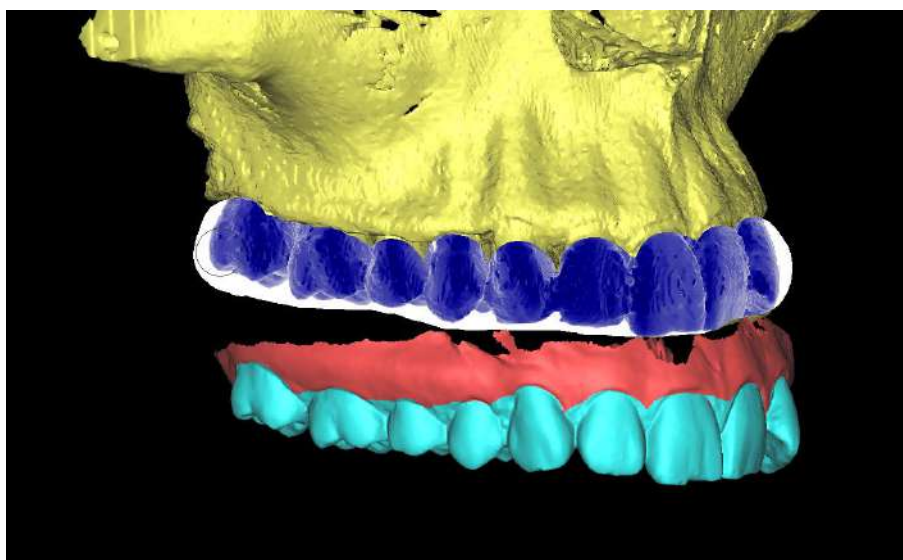


Рисунок 27 - Метод выделения интересующей области сопоставления моделей инструментом «кисть»

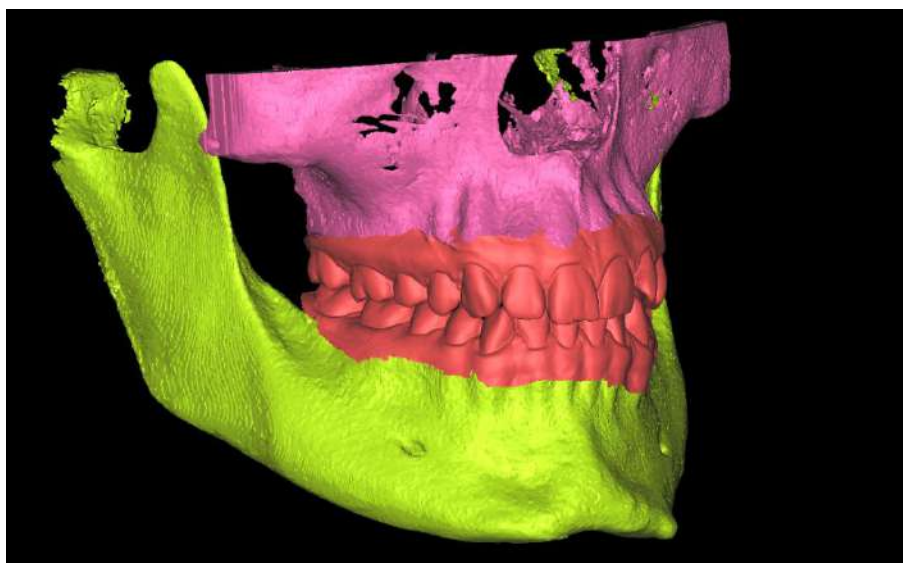


Рисунок 28 - Сопоставленная модель зубных рядов и сегментированных моделей КТ исследования

После выполнения данной функции необходимо удалить из анализа ткани зубов путем сегментации набора моделей. Из моделей, полученных по данным КТ, путем сегментации пороговыми значениями по шкале Хаунсфилда удаляются коронковые части зубов (рисунок 29).

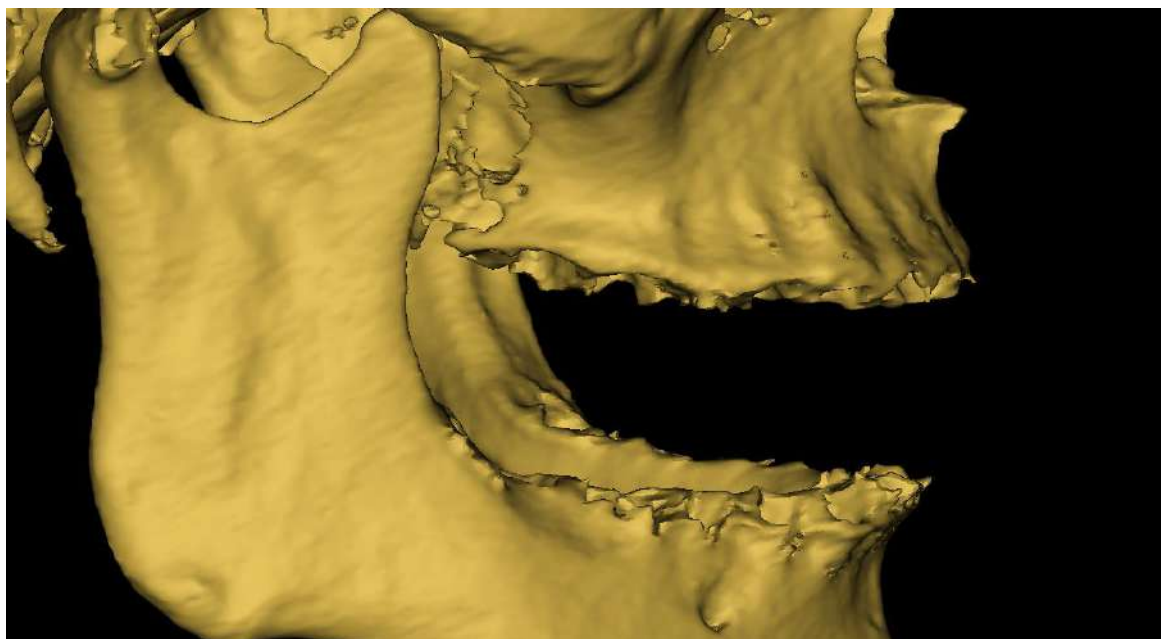


Рисунок 29 - Сегментированная модель костных структур без зубов

Для стабильности и повторяемости результата получения моделей без повторяющейся геометрии из методики убраны факторы, влияющие на обработку трехмерных моделей, поэтому вместо ручной обработки была выбрана обработка при помощи компьютерных алгоритмов.

Сегментация зубов и мягких тканей на моделях, полученных путем интраорального сканирования, производится обрезкой по десневому контуру со сглаживанием линии выделения и созданием двух отдельных моделей зубных рядов и мягких тканей полости рта (рисунок 30 - 32).

Обработка совмещенных моделей: обрезка зубов, десны, удаление зубов на трехмерных моделях из КТ.

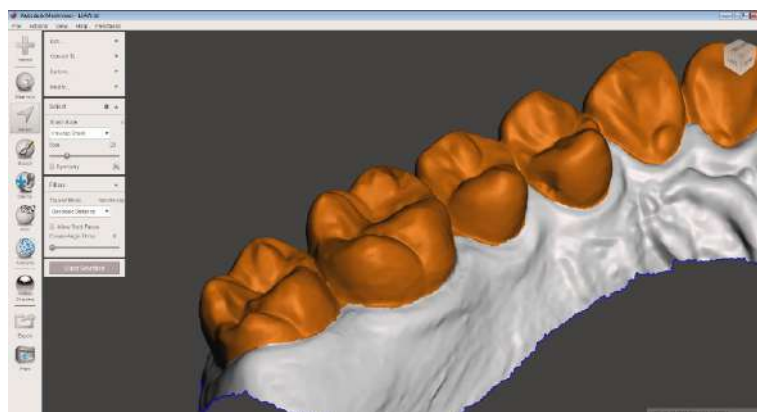


Рисунок 30 - Сегментация зубов на трехмерной модели

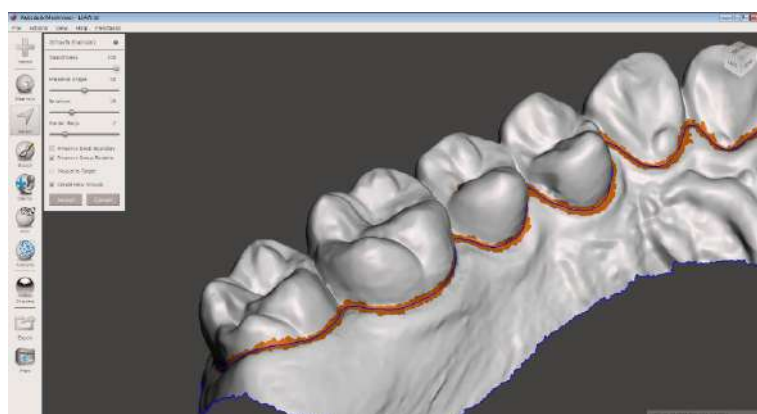


Рисунок 31 - Сглаживание контуров выделенной модели зубных рядов



Рисунок 32 - Раздельные модели зубов и мягких тканей в собранной модели



На следующем этапе обработки на трехмерных моделях происходит построение области вокруг зубных рядов, в частности вокруг сегментированных зубов без мягких тканей и с фиксированной границей по десневому краю, что не влияет на объем удаляемой информации путем операций Булева. После сегментации зубов отдельная модель была скопирована путем дублирования, и произведена математическая операция экструзии на 1 мм, что дало достаточную зону охвата. Плоскости заполнения модели сходились в центре под небольшим углом (рисунок 33, 34).

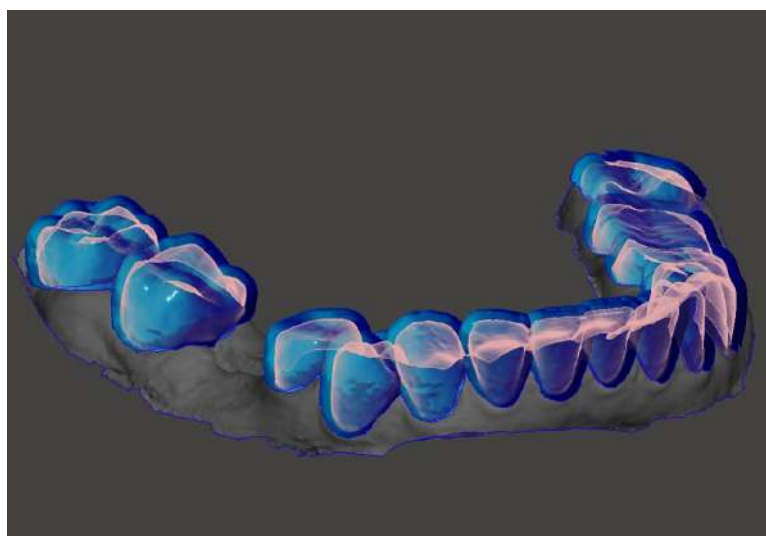


Рисунок 33 - Экструзия сегментированной модели зубов на 1 мм

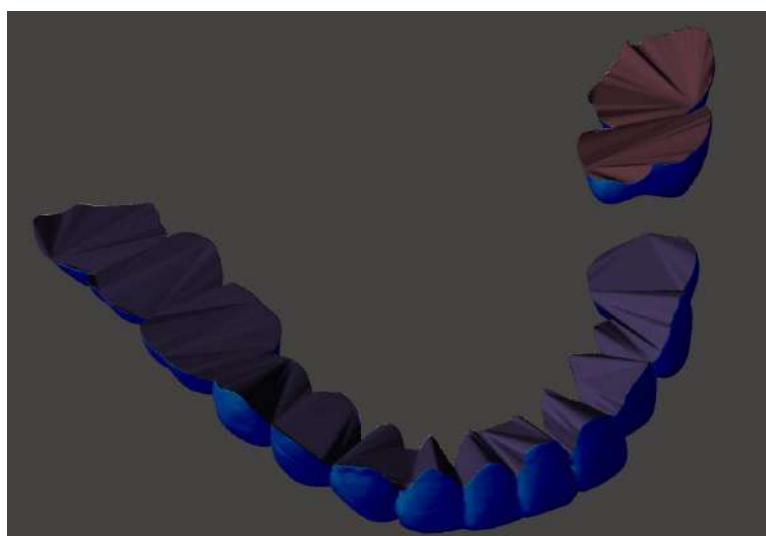


Рисунок 34 - Закрытие контуров сегментированной модели

Для проведения функций Булева с трехмерными объектами были созданы цельные модели из оболочек верхней и нижней челюсти, а также из сегментированных закрытых моделей верхнего и нижнего зубного ряда (рисунок 35).

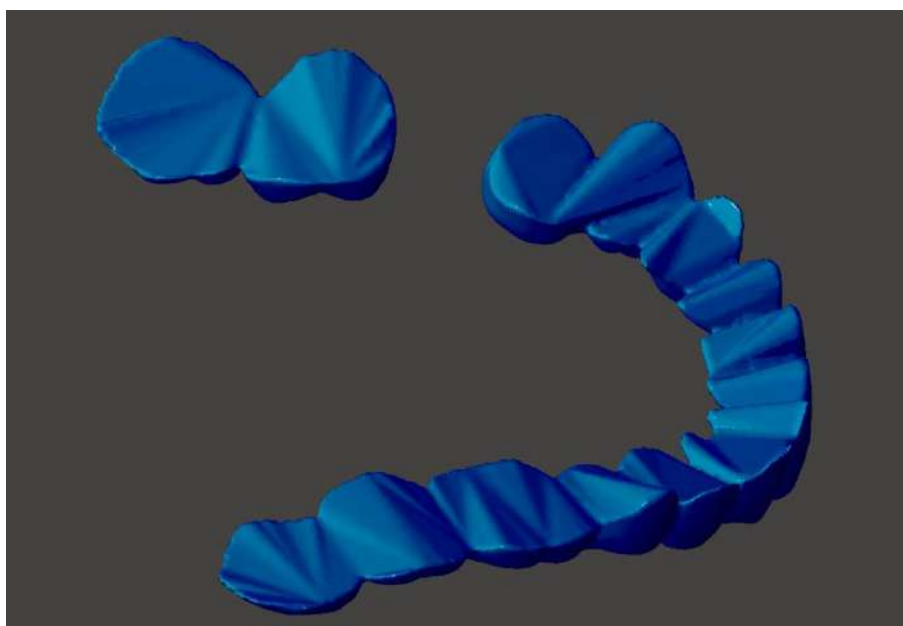


Рисунок 35 - Создание из оболочки в цельную модель

После выполнения функций Булева выполнялась остаточная автоматическая доработка моделей по закрытию и устранению ошибок в геометрии (рисунок 36, 39).

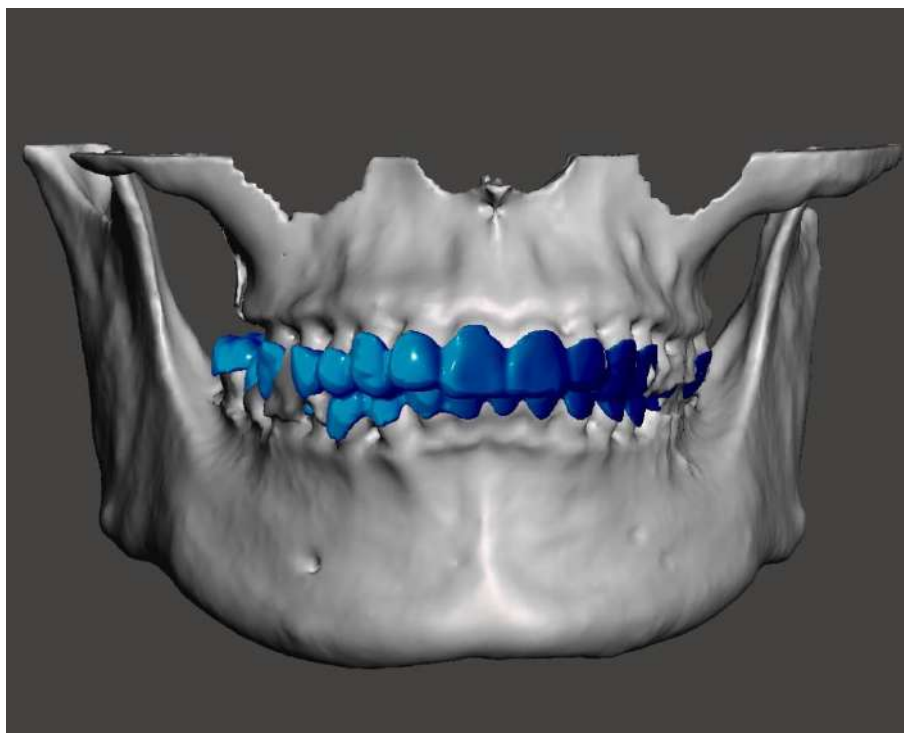


Рисунок 36 - Целные модели перед выполнением функции Булева

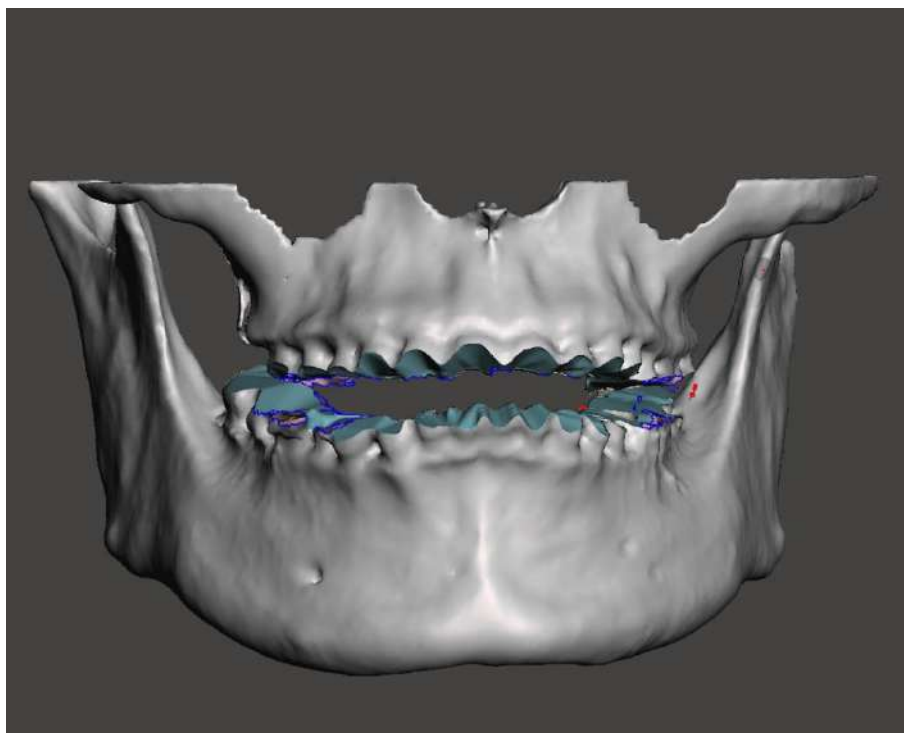


Рисунок 37 - Трехмерная модель нижней и верхней челюсти после выполнения функция Булева

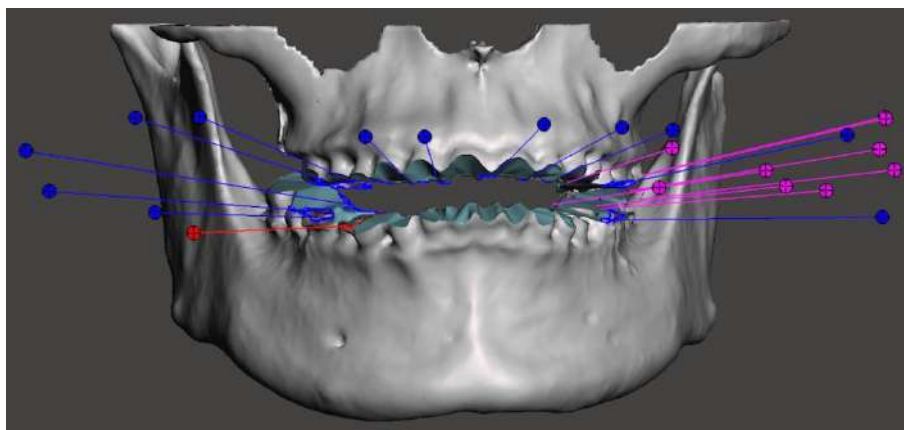


Рисунок 38 - Автоматическое устранение ошибок геометрии

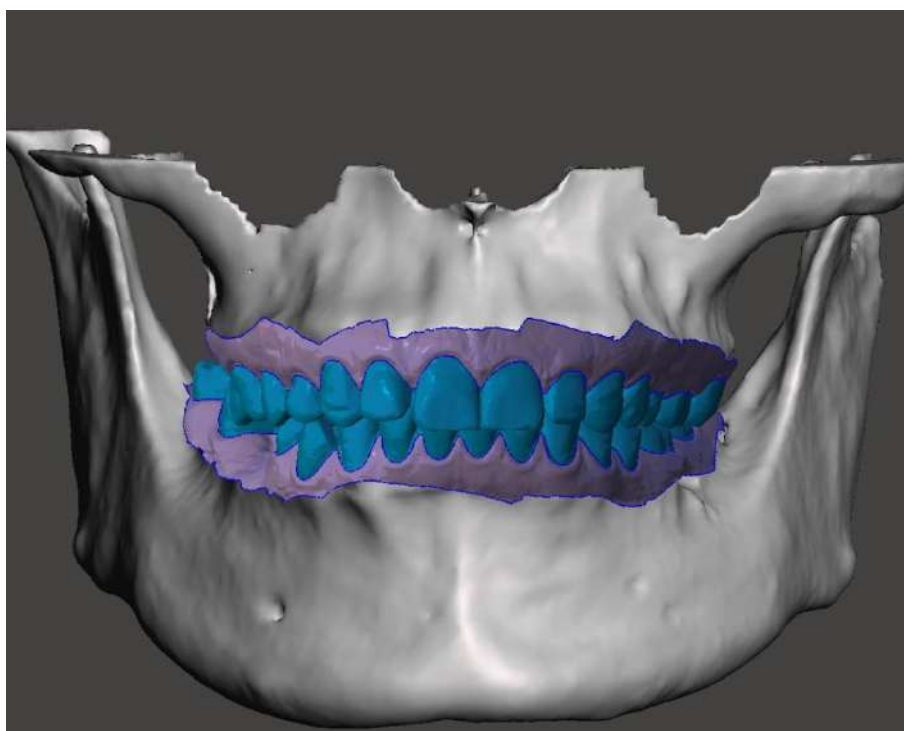


Рисунок 39 - Сборная трехмерная модель, подготовленная для анализа

### 3.2.2 Создание цифровой модели биотипа СОПР

После получения готовых обработанных моделей производилась настройка шкалы распределения по абсолютным значениям в программном обеспечении Cloud Compare (рисунок 40, 41). Сегментированные модели зубных рядов, костной

ткани и мягких тканей импортировались в программу, где проводился анализ выделенных оболочек (рисунок 42).

Обработка данных в CloudCompare, настройка, цветовая систематизация.

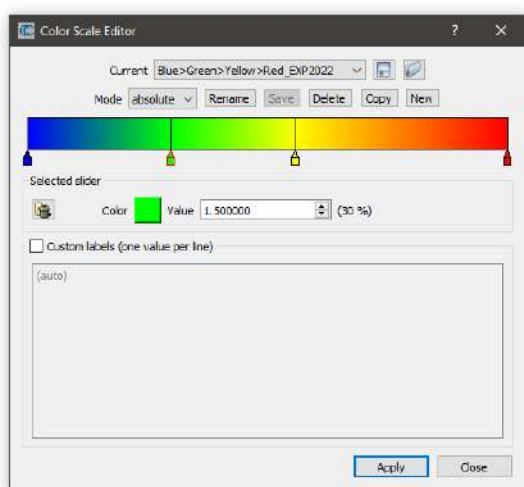


Рисунок 40 - Значение среднего биотипа слизистой полости рта

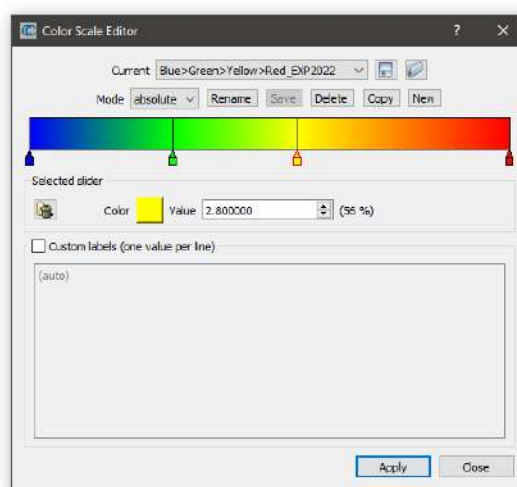


Рисунок 41 - Значение толстого биотипа полости рта

Систематизированный подход к изучению полученных моделей и создание карт расстояний является важным шагом и формирует дальнейшее распределение на группы по цветовой градации. Относительные величины шкалы равномерно распределяют цветовую палитру и при одинаковом значении толщины слизистой оболочки полости рта на различных моделях будут давать разный цвет, что в свою очередь даст ошибочное распределение на группы биотипов слизистой полости рта.

Поэтому для систематизации были использованы абсолютные величины шкалы градации цветов, и данная схема была применена на всех исследуемых моделях.

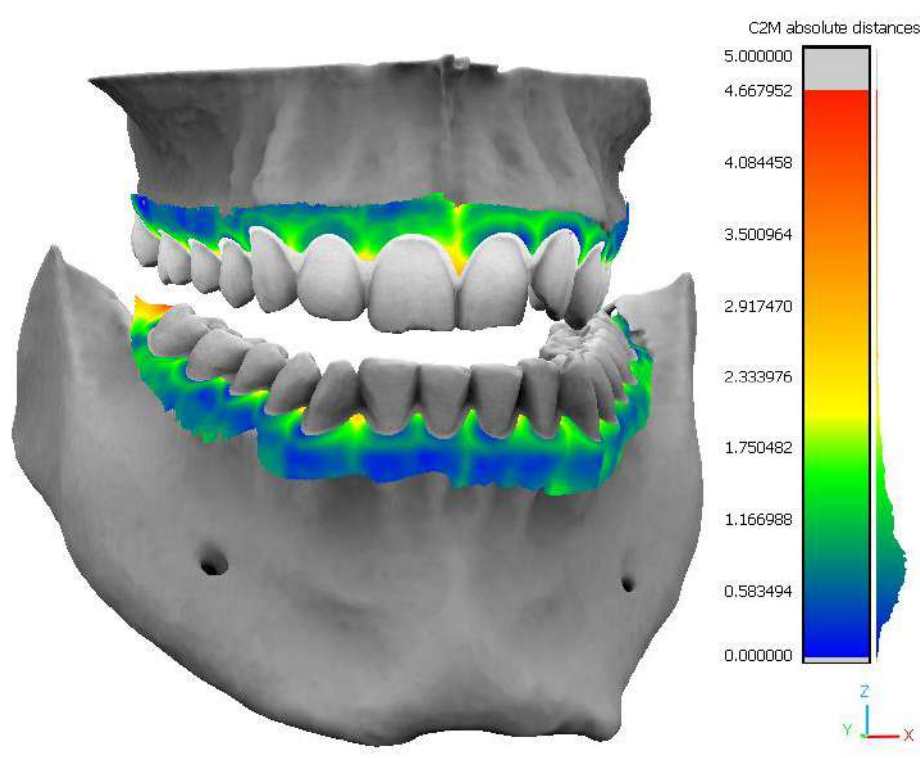


Рисунок 42 - Карта толщины мягких тканей

Исходя из полученных данных, всю область анализа можно разделить на три зоны (рисунок 43):

Вестибулярная поверхность от зубов 18 до 28 и от 38 до 48.

Оральная поверхность от зубов 15 до 25 и от 35 до 45.

Оральная поверхность от зубов 18 до 15, от 28 до 25, от 38 до 35, от 48 до 45.

Данное сегментирование на зоны видно на графике распределения (рисунок 44).

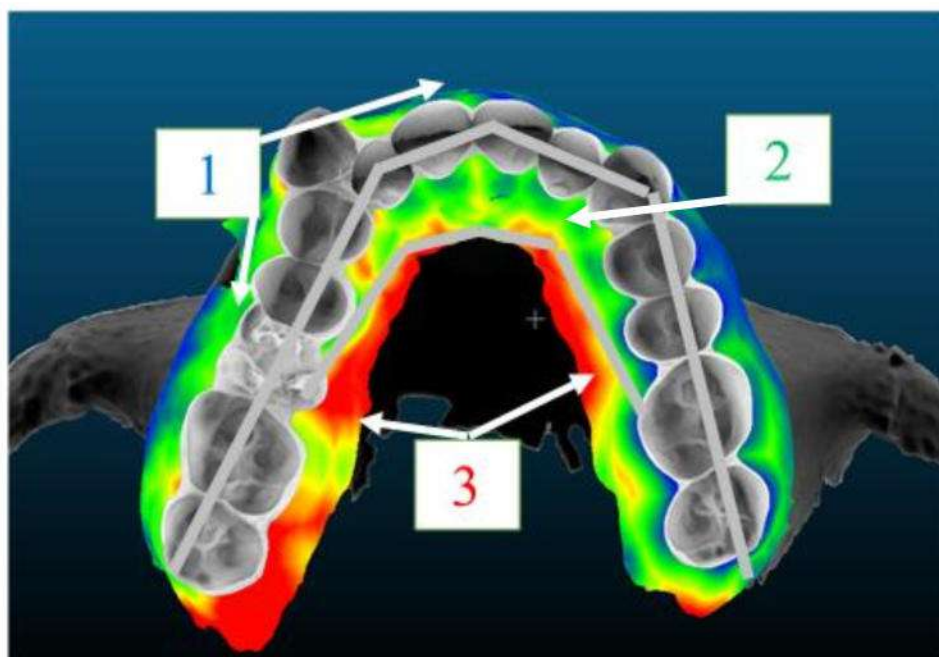


Рисунок 43 - Распределение на зоны толщины слизистой

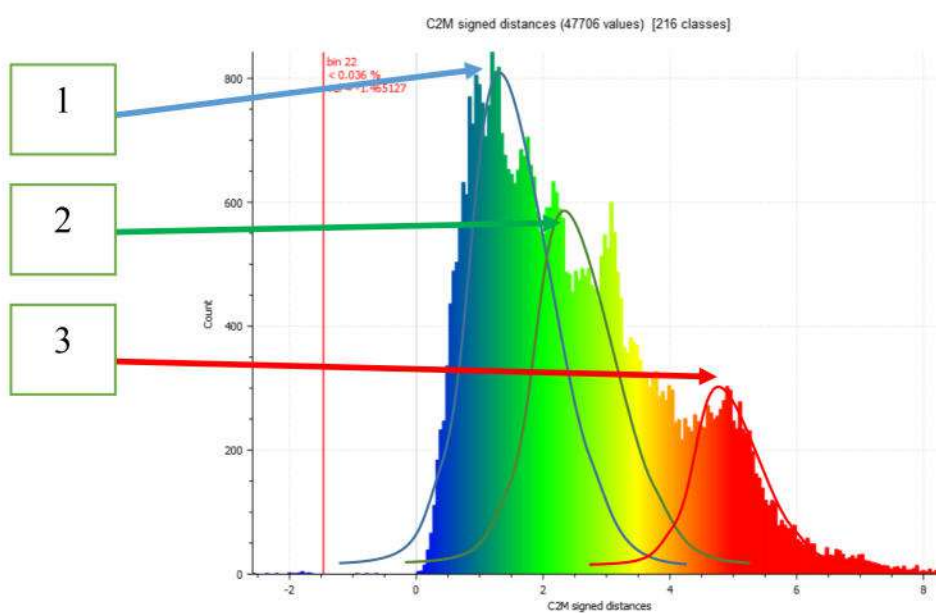


Рисунок 44 - Зоны распределения толщины слизистой полости рта

При анализе распределения видны три пересекающиеся дисперсии, соответствующие зонам, описанным выше. Построив распределения и выполнив



их интерполяцию на результаты проведенных контрольных измерений в полости рта методом просвечивания зонда через слизистую, получили различные картины обоих распределений, характерных для трех биотипов слизистой полости рта.

Контрольные измерения проводились традиционным методом – при помощи пародонтологического зонда и оценки просвечиваемости прикрепленной десны. Собранные качественные данные помогли разделить количественные данные на первичные группы, и провести анализ по точному определению биотипа слизистой и интерполяции количественных данных на качественные (рисунок 45).

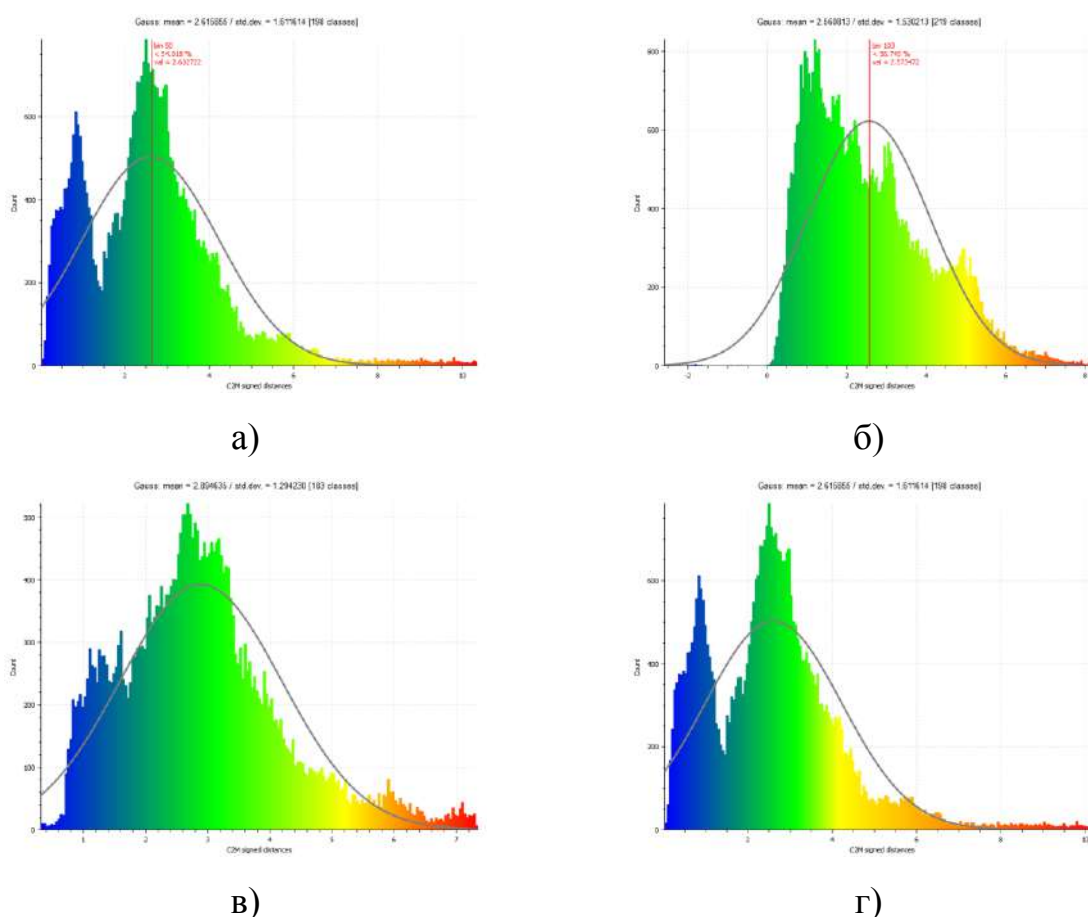


Рисунок 45 - Интерпретация нормального распределения на графике зон распределения толщины слизистой, указывающая на сдвиг в сторону толщины биотипа СОПР. (а), (б), (в), (г)



### 3.2.3 Сравнение методик сегментации данных КТ

Получить результат сегментирования при работе с КТ можно различными методами. При работе с небольшим объемом КТ, можно использовать ручное сегментирование. По мере развития инструментов выделения нужных масок скорость обработки существенно возрастает, однако, когда обрабатывается большое количество слоев, прецизионность результата уменьшается. Было проведено сравнение, насколько влияет на результат измерений выбор метода сегментирования. Результаты ручной и автоматической при помощи алгоритмов ИИ сегментации представлены на рисунках (рисунок 46 - 49).

С использованием сегментации ИИ

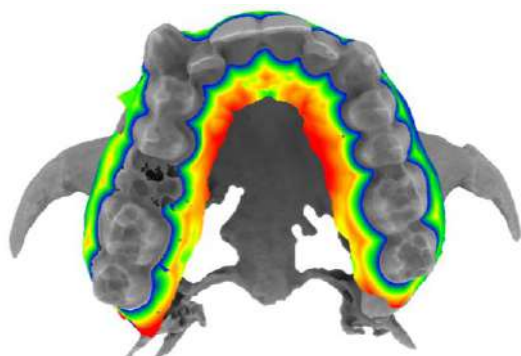


Рисунок 46 - Распределение толщины СОПР на верхней челюсти на сегментированной модели автоматическим способом

Без использования сегментации ИИ

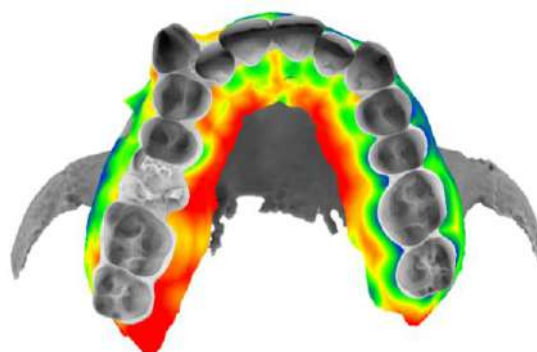


Рисунок 47 - Распределение толщины СОПР на верхней челюсти на сегментированной модели ручным способом

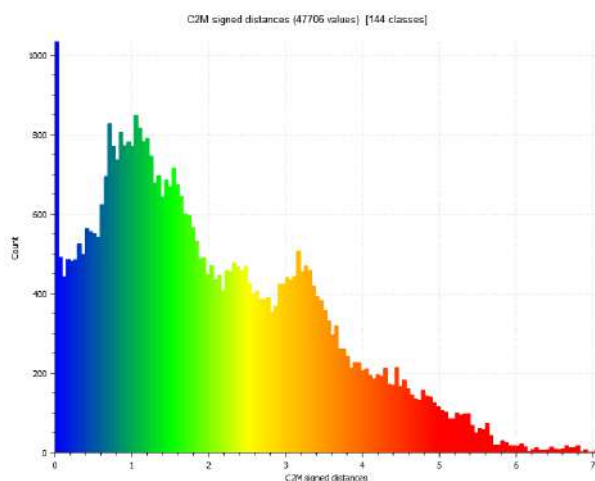


Рисунок 48 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти на сегментированной модели автоматическим способом

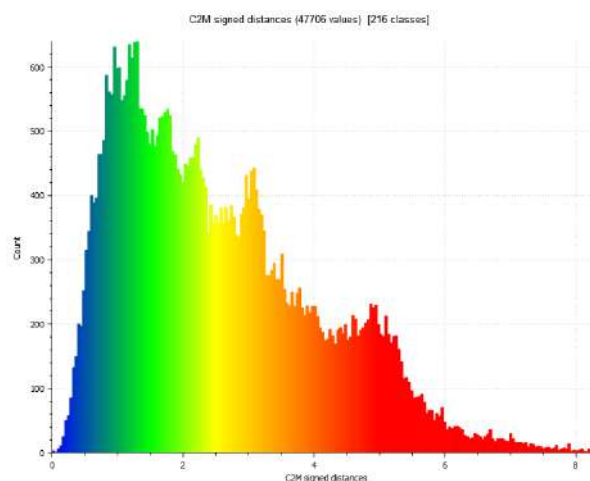


Рисунок 49 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти на сегментированной модели ручным способом

Для достижения стабильного результата с наименьшей погрешностью при обработке данных КТ, создании масок каждого слоя и генерировании сетки трехмерной модели используются автоматические алгоритмы сегментирования, вместо ручного. Результат, в конечном счете, ручного и автоматического сегментирования остается неизменным. Однако на графике распределения толщины слизистой при автоматическом сегментировании можно отметить папиллярную оболочку (рисунок 50).

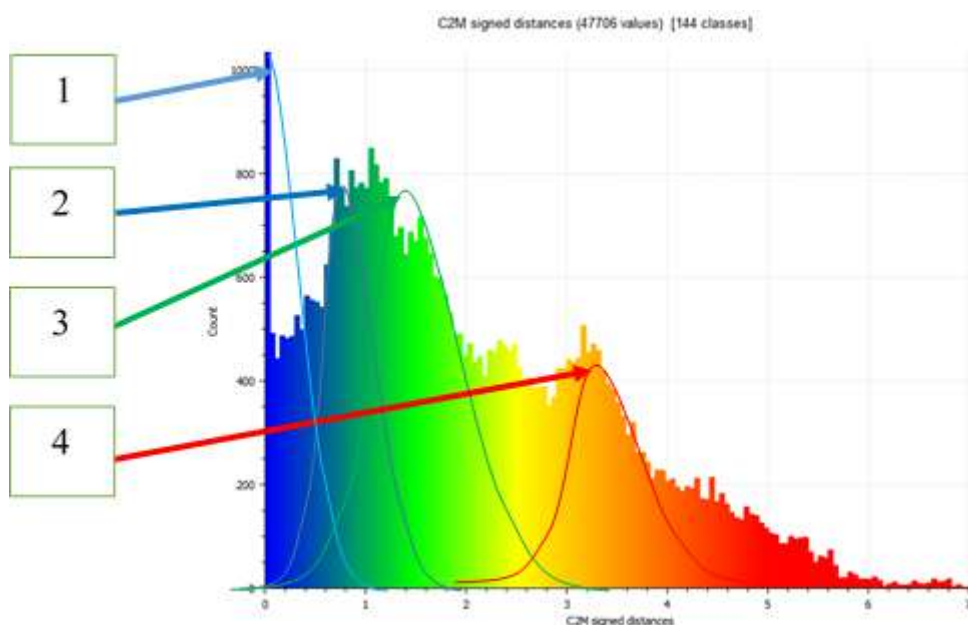


Рисунок 50 - Зоны распределение толщины слизистой на графике при автоматическом сегментировании с использованием ИИ

Ниже приведены примеры графиков распределения толщины слизистой полости рта у различных пациентов; визуализация данных КТ на трехмерных моделях; корреляционный анализ определения СОПР методом просвечивания десны; окрашивание СОПР препаратом «Колор-Тест №1» и распределение толщины СОПР на трехмерных моделях при различных классификациях СОПР (рисунок 51 - 59).

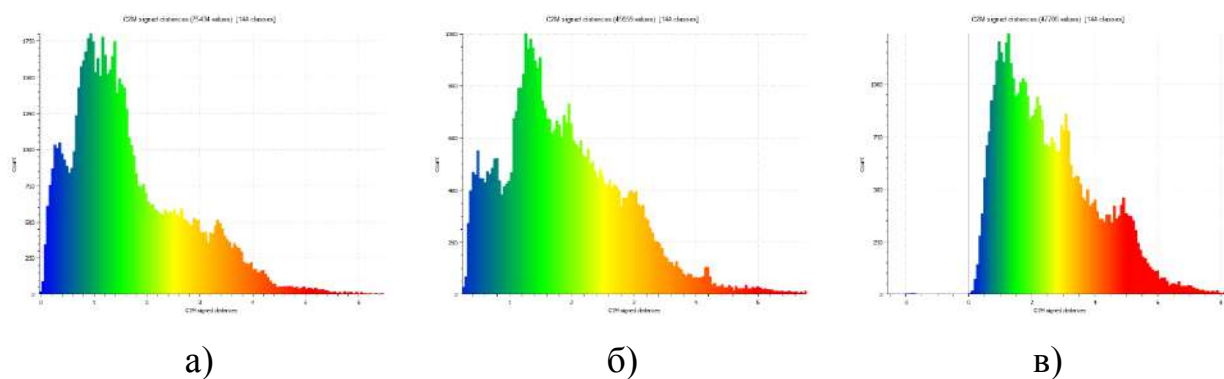


Рисунок 51 - Распределение толщины СОПР на модели верхней челюсти, сегментированной ручным способом. Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР

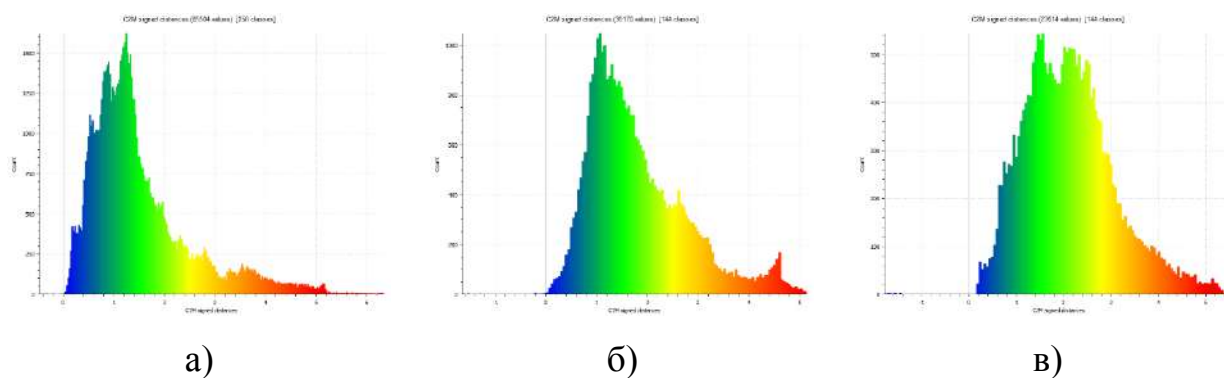


Рисунок 52 - Распределение толщины СОПР на модели нижней челюсти, сегментированной ручным способом. Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР



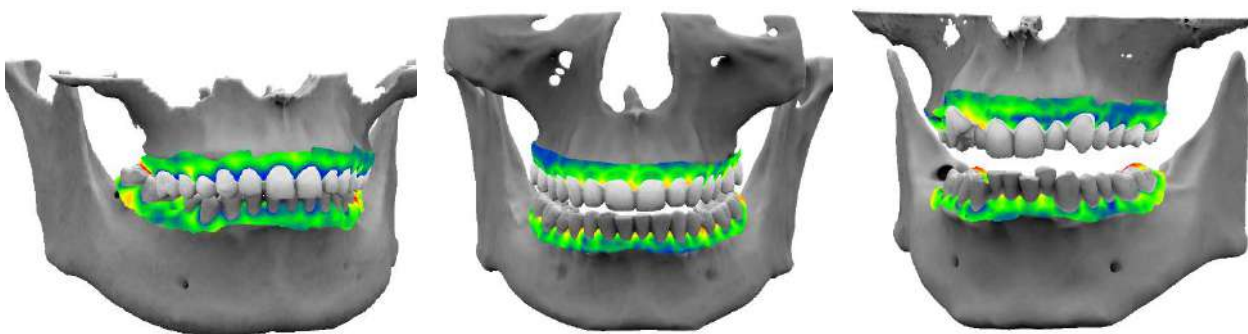
а)

б)

в)

Рисунок 53 - Определение биотипа СОПР методом просвечивания зонда.

Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР



а)

б)

в)

Рисунок 54 - Трехмерная карта девиаций для определения биотипа СОПР.

Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР

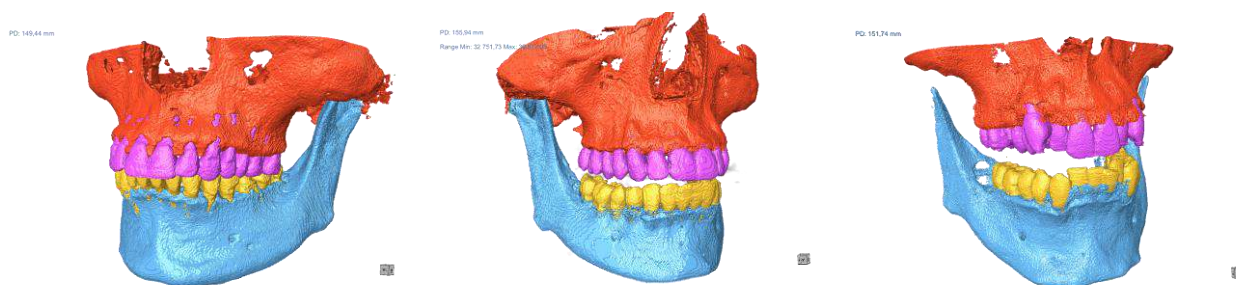


а)

б)

в)

Рисунок 55 - Определение воспаления при помощи «Колор-тест №1» Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР



а)

б)

в)

Рисунок 56 - Трехмерная модель костных структур и зубных рядов, полученная из КТ методом сегментирования при помощи ИИ.

Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР





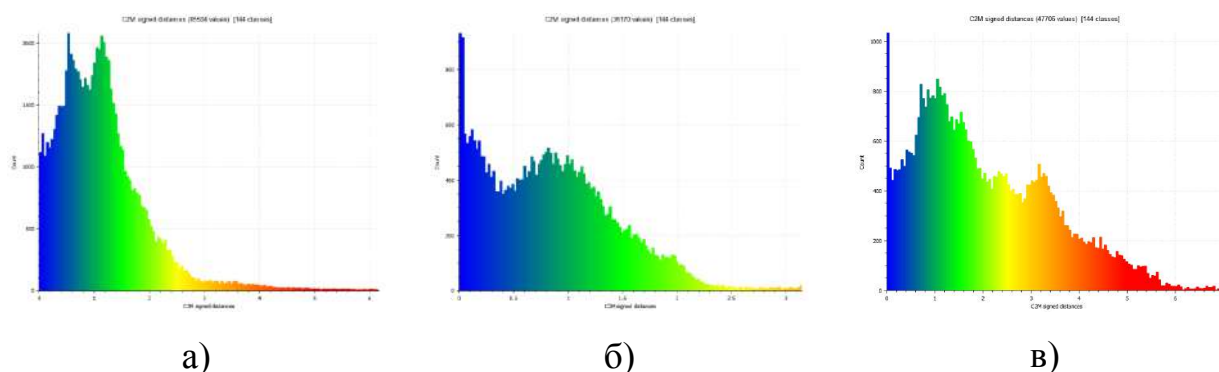


Рисунок 59 - Распределение толщины СОПР на трехмерной модели нижней челюсти, сегментированной при помощи ИИ. Тонкий (а), средний (б), толстый (в) биотип СОПР

Проведенные исследования показали, что дисперсионный анализ распределения зон выявил три типа слизистой полости рта – тонкий, толстый и смешанный в соответствии с традиционными исследованиями при помощи пародонтологического зонда. СОПР с признаками воспалительных процессов были исключены из исследования.

### 3.2.4 Сегментация данных КТ

Данное исследование состояло из теоретической части, где были выполнены расчеты распределения деформаций в конструкциях элайнеров, и клинической части, где полученные данные были апробированы во время клинических приемов.

Данные, полученные в результате сегментирования КТ и представленные в виде трехмерных моделей верхних и нижних челюстей, являются отправной точкой для дальнейших исследований, таких как создание трехмерных моделей зубных рядов, применяя интраоральное сканирование, планирование различных ортодонтических конструкций, определение возможности применения имплантатов и шаблонов (рисунок 60).



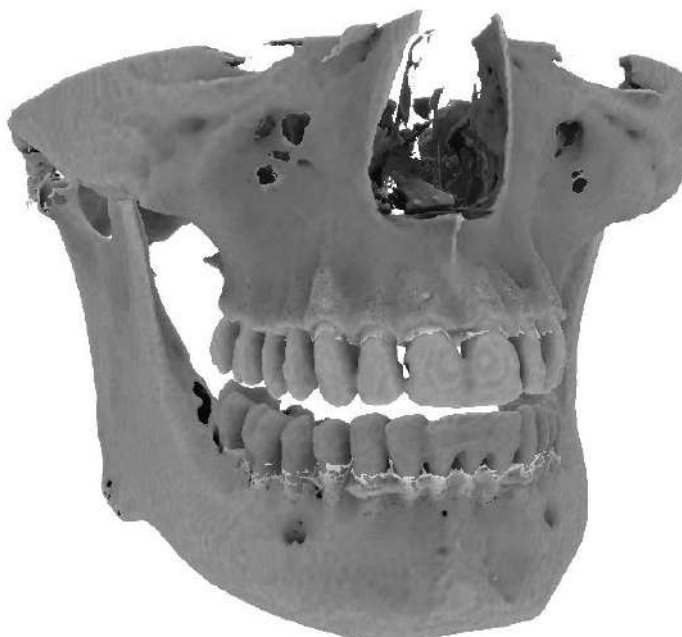


Рисунок 60 - Трехмерная модель верхней и нижней челюсти после сегментации  
ручным способом

### 3.3 Сегментация при помощи ИИ

Для автоматической сегментации был произведен сбор и предварительная обработка данных. В исследовании использовались данные, полученные при помощи аппарата КЛКТ, и обработаны в программном обеспечении Dragonfly (v.2022.2, Objects Research Systems, Монреаль, QC, Канада). Нормализованное значение HU данных КЛКТ было установлено равным 0-1.

#### 3.3.1 Нормализация данных КТ

Чтобы уменьшить объем вычисляемых данных, следует выполнить предварительную обработку. Во-первых, данные были нормализованы. Изображения в КЛКТ были представлены с помощью HU [229]. HU - это безразмерная универсальная единица, используемая в компьютерной томографии (КТ) для выражения чисел КТ, полученных в результате линейного преобразования измеренных коэффициентов ослабления [144]. Результаты основаны на произвольно заданных плотностях воздуха и чистой воды. Они находятся в диапазоне от -1000 HU для воздуха и более 3000 для металлов [121]. В этом исследовании нормализация выполнялась с помощью линейной функции:

$$y = mx + b,$$

где  $x$  относится к HU, полученному при помощи машины КЛКТ, с минимальным значением (-1000) и максимальным значением (3000-20000), который зависит от различных параметров аппарата и процесса сканирования, а также дозы облучения;  $y$  - заданное значение HU в диапазоне 0-1. В этих данных среднее значение HU составило 0,16. Значение стандартного отклонения составило 0,15. Вероятность карты распределения HU КЛКТ показана на рисунке 61. После нормализации карта распределения вероятностей HU показана на рисунке 62.

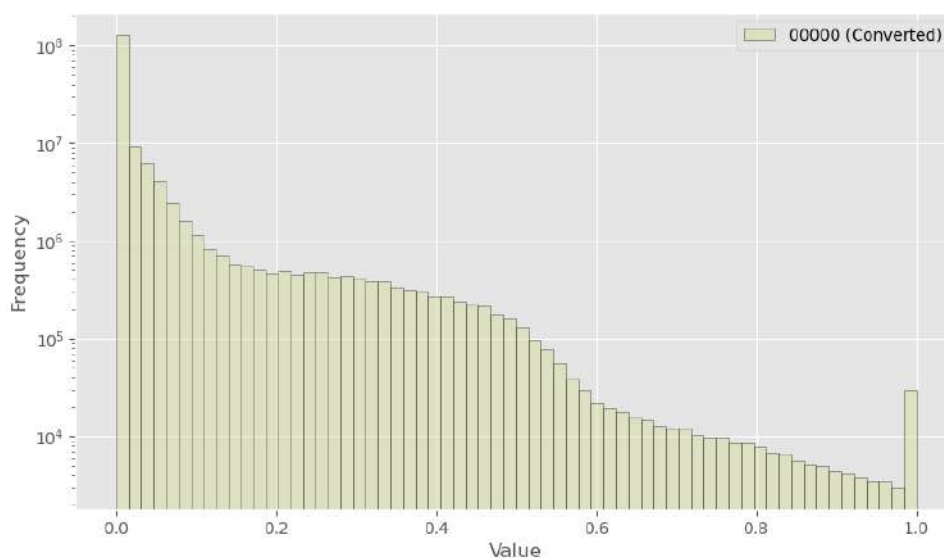


Рисунок 61 - Вероятность карты распределения HU КЛКТ

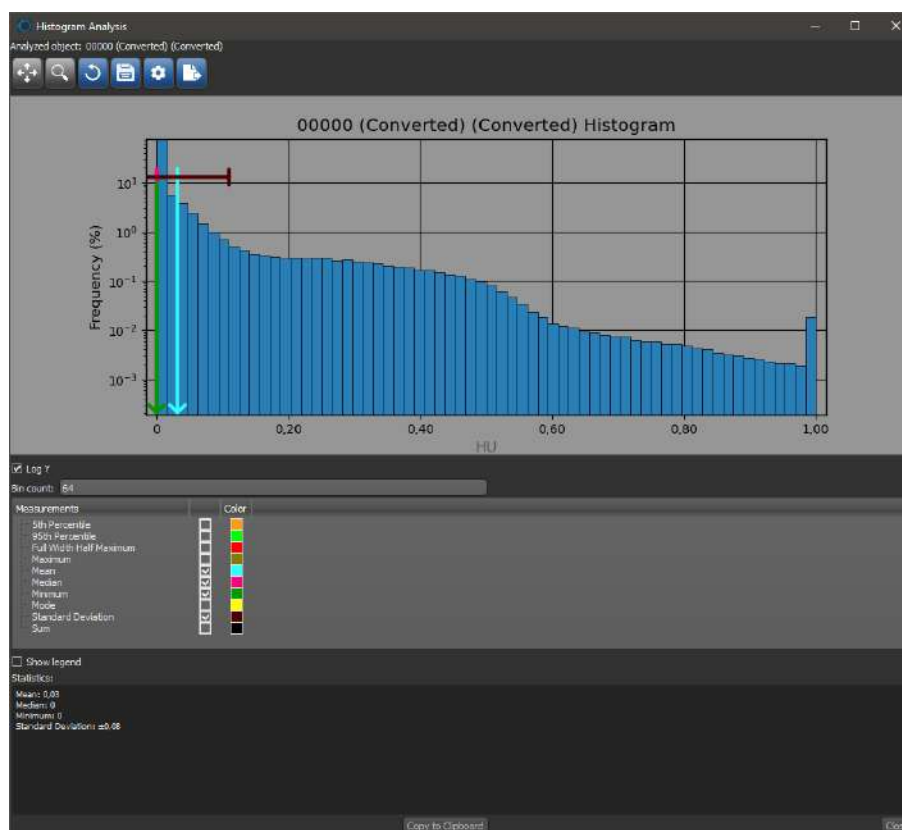


Рисунок 62 - Вероятность карты распределения HU КЛКТ после нормализации

### 3.3.2 Аннотация данных слоев КТ

Цель семантической сегментации изображения состоит в том, чтобы пометить каждый пиксель изображения соответствующим классом представления. Выход представляет собой изображение с высоким разрешением, в котором каждый пиксель отнесен к определенному классу. Размер выходного изображения обычно совпадает с размером входного изображения. Каждое изображение было помечено пятью различными цветами, которые использовались для представления пяти классов (верхний зубной ряд, нижний зубной ряд, верхняя челюсть, нижняя челюсть и фон) (рисунок 63). Изображения были нормализованы, как показано на верхнем изображении на рисунке 64, а результат, отмеченный вручную, представлен на нижнем изображении на рисунке 64.

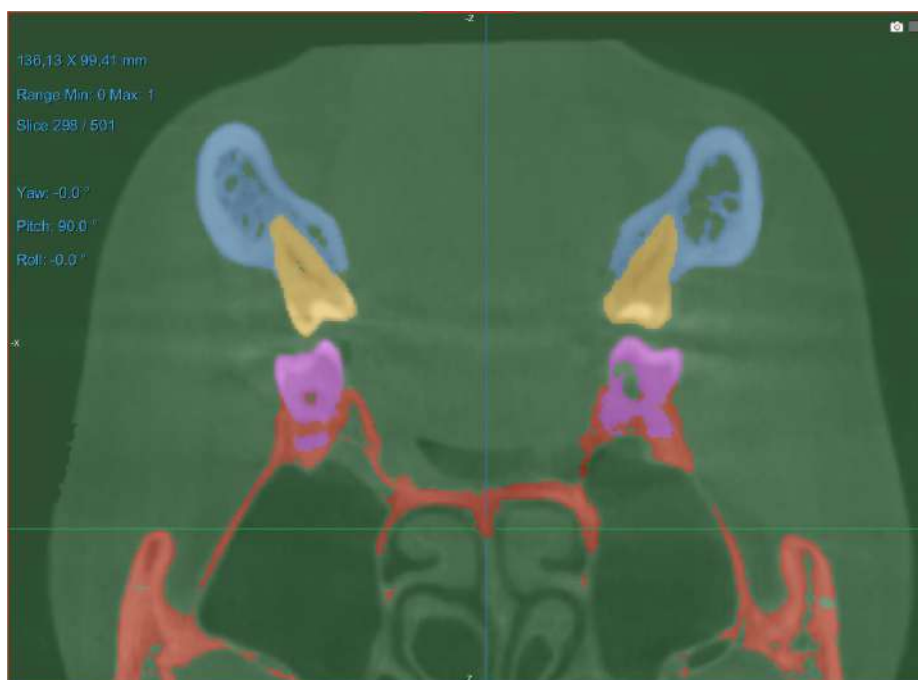


Рисунок 63 - Семантическая сегментация КЛКТ. Изображение разделено на пять классов, в которых зубы верхнего зубного ряда - фиолетовые, нижнего – желтые.

Костные ткани верхней челюсти - красные, костные ткани нижней челюсти – синие. Фон зеленый

### 3.3.3 Увеличение объема данных обучения ИИ

Увеличение данных — это метод искусственного создания большего количества обучающих выборок для увеличения разнообразия обучающих данных. Это может быть достигнуто путем применения аффинных преобразований (например, поворота и масштабирования), то есть путем перемещения по вертикали и горизонтали к исходным помеченным образцам. Яркость изображения была случайным образом изменена путем указания коэффициента яркости из-за различных значений HU в разных данных КЛКТ. Коэффициент яркости был выбран произвольным образом в диапазоне  $[-0,2]$ . Изменение яркости позволяет модели выполнять обобщение по всем обученным изображениям при разных уровнях засветки. Данные были дополнены 10 раз с использованием разных факторов.

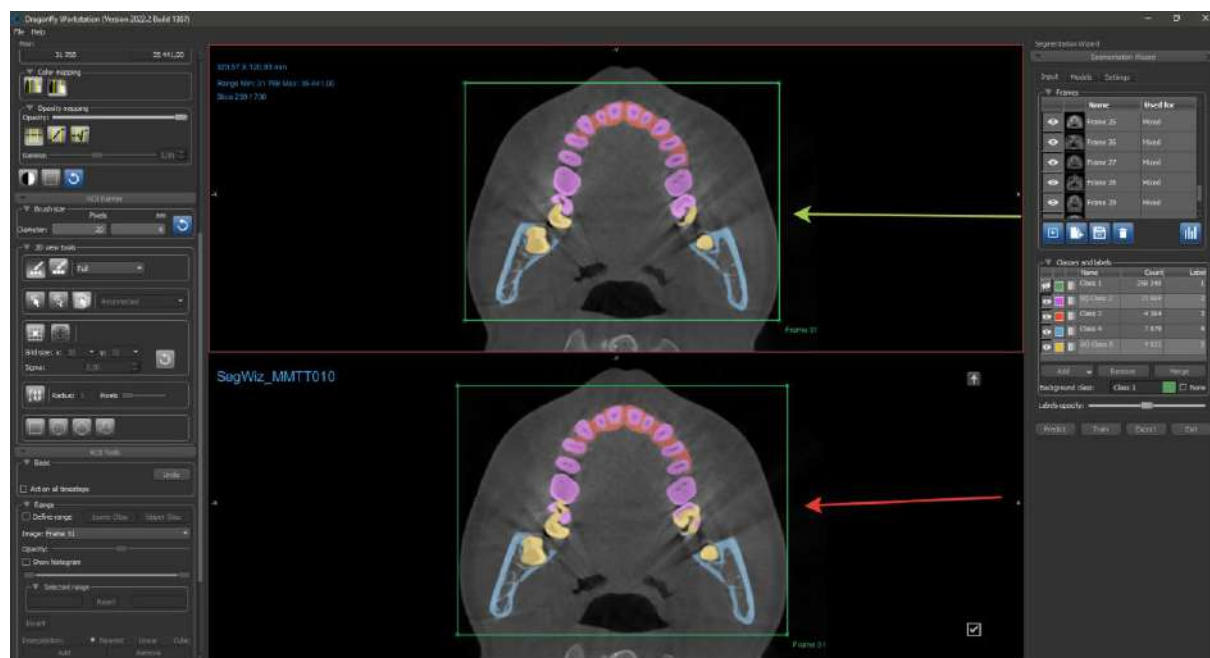


Рисунок 64 - Аннотированный результат одного из образцов КЛКТ

### Ручное сегментирование при обучении U-Net

Ручное сегментирование проводится для создания якорных слоев, по которым проходило обучение нейросети, и при необходимости в случае возникновения большого количества ошибок, будет дополняться коррекционными слоями с масками (рисунок 65, 66).

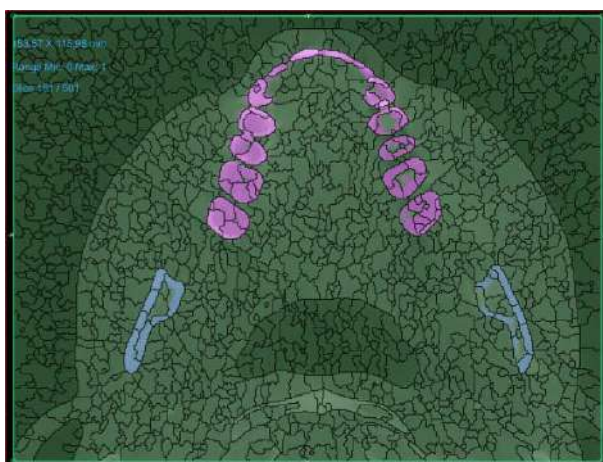


Рисунок 65 - Ручное-островное сегментирование верхней и нижней челюсти при подготовке обучающей модели. Фиолетовый цвет – зубной ряд верхней челюсти. Голубой цвет – костная структура нижней челюсти, зеленый цвет – фон

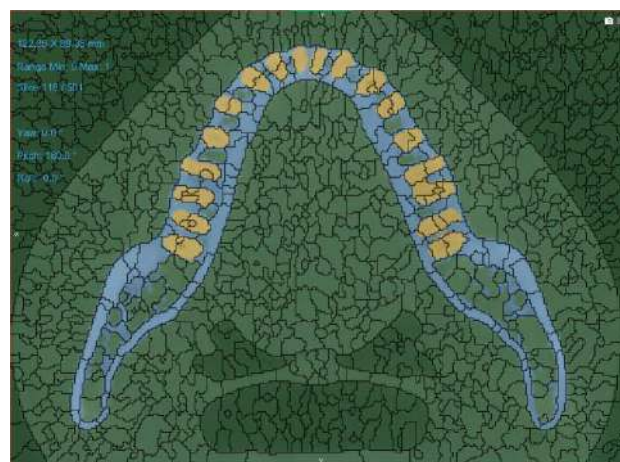


Рисунок 66 - Ручное-островное сегментирование верхней и нижней челюсти при подготовке обучающей модели. Желтый цвет – зубной ряд нижней челюсти. Голубой цвет – костная структура нижней челюсти, зеленый цвет – фон

#### 3.3.4 Семантическая сегментация изображений с помощью U-Net

Цель этого шага - пометить каждый пиксель изображения соответствующим классом. 2D модель U-Net состоит из кодирующей и декодирующей частей [248]. Параметры обучения в U-Net следующие: количество слоев в модели = 4, размер патча = 64, размер пакета = 32 и функция потерь = потеря кубика. Обучение

проводится с использованием 100 эпох, однако оно прекращается, если не происходит улучшения «ценности потери» в течение 10 эпох подряд. Общая структура сети проиллюстрирована на рисунке 67.

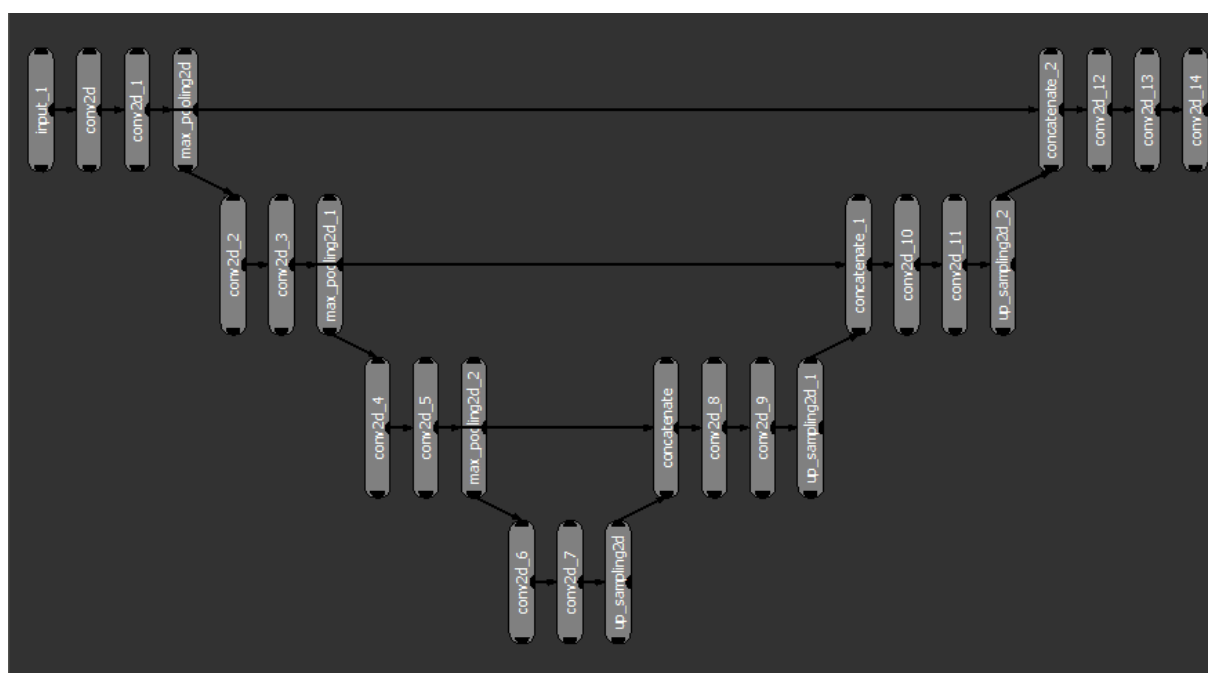


Рисунок 67 - Архитектура 2D U-Net

Шум изображения из ROI был удален, данные сглажены, затем на основе ROI была создана реконструкция 3D-модели. Небольшие несвязанные шумы, которые составляли менее  $0,8 \text{ нм}^3$ , были исключены (рисунок 68).



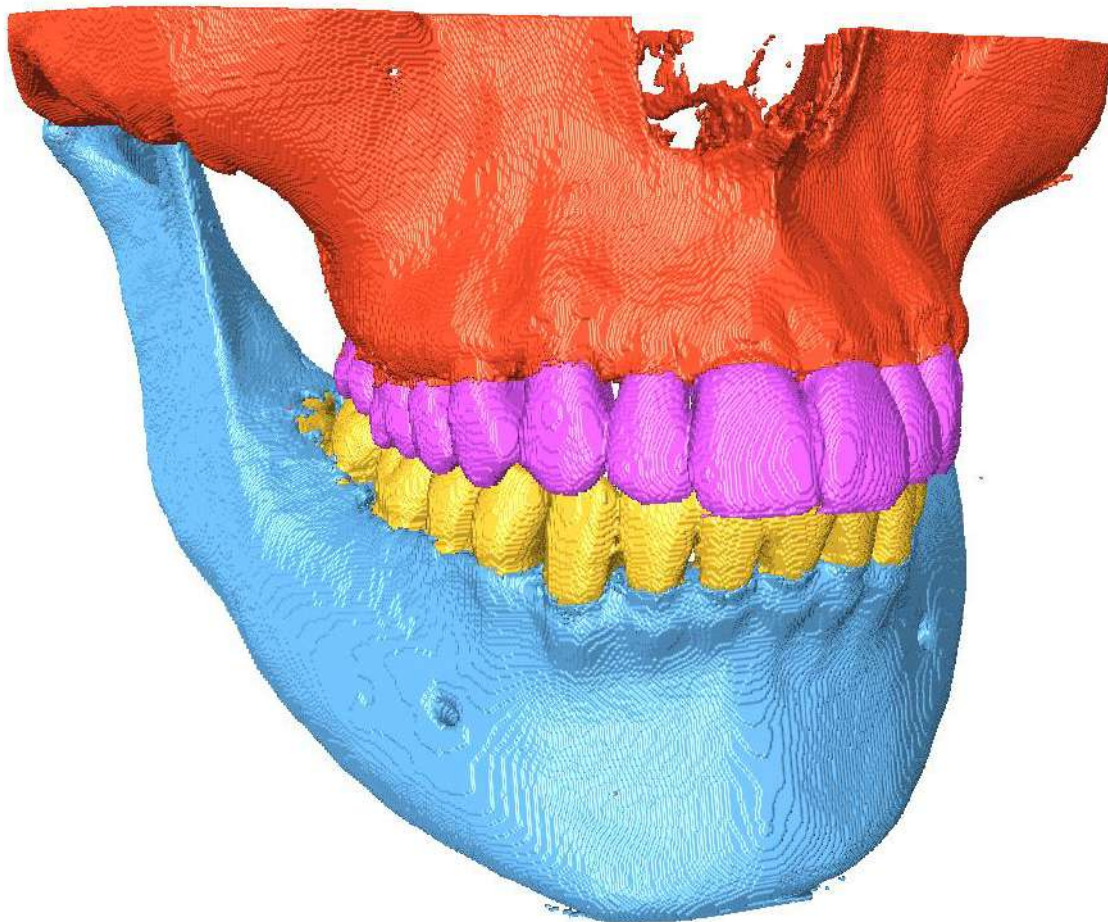


Рисунок 68 - Результат построения трехмерной модели после финального обучения нейронной сети U-Net

**Нормализация важна для предварительной обработки изображений.** Если изображение не будет предварительно обработано, то в процессе обучения сеть будет расходиться, а это приведет к тому, что значение функции потерь достигнет бесконечности. Нормализация выполняется путем линейного преобразования, и результирующее значение находится в диапазоне от 0 до 1. Если нормализованный диапазон будет отличаться от указанного, то это повлияет на результат. Однако с увеличением объема данных в процессе обучения полученная модель U-Net может быть использована в новом КЛКТ.

Gan Y. и соавторы [113] предложили метод извлечения объединенной области зуба и альвеолярной кости из изображений компьютерной томографии,



используя глобальную модель набора выпуклых уровней. Однако этот метод может быть использован в случае, когда зубы у пациентов находятся в позиции открытого прикуса. В данном исследовании предложен U-Net в сочетании с методом увеличения данных для достижения автоматической сегментации различных тканей при закрытом прикусе.

В этом исследовании эффективность сегментации изображений была значительно повышена при помощи обучения сети путем ручной маркировки пяти изображений.

В недалеком будущем за счет расширения объема данных будет выполнена полностью автоматическая сегментация и идентификация множества тканей в полости рта. Точность автоматической сегментации может быть существенно увеличена, что позволит значительно улучшить автоматизированную диагностику в стоматологии.

### **3.3.5 Сегментация КТ при помощи ИИ**

Были созданы рабочие слои для тренировки нейронной сети U-Net путем подготовки и обработки входных данных КТ.

Была обучена нейронная сеть, и как результат, был создан автоматический алгоритм сегментирования костных структур и зубных рядов из данных КТ.

На произвольно взятых моделях (рисунок 69) был проведен анализ контроля девиаций, с помощью которого могли быть обнаружены ошибки сегментирования. Полученный результат с контролем точности сегментирования эффективно работает с большим объемом данных и за короткий промежуток времени (рисунок 70).

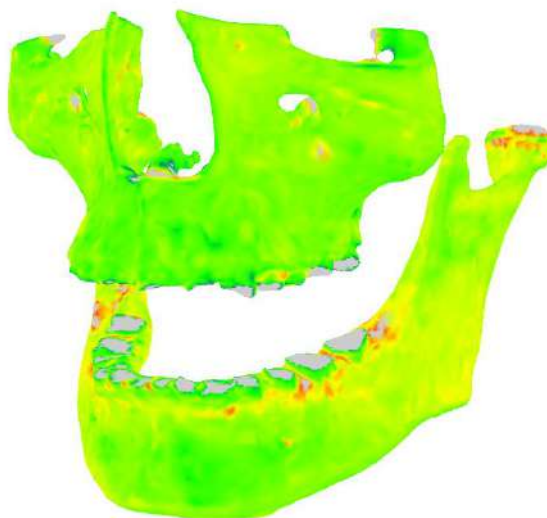


Рисунок 69 - Карта девиаций моделей челюстей, сегментированных ручным способом и при помощи ИИ

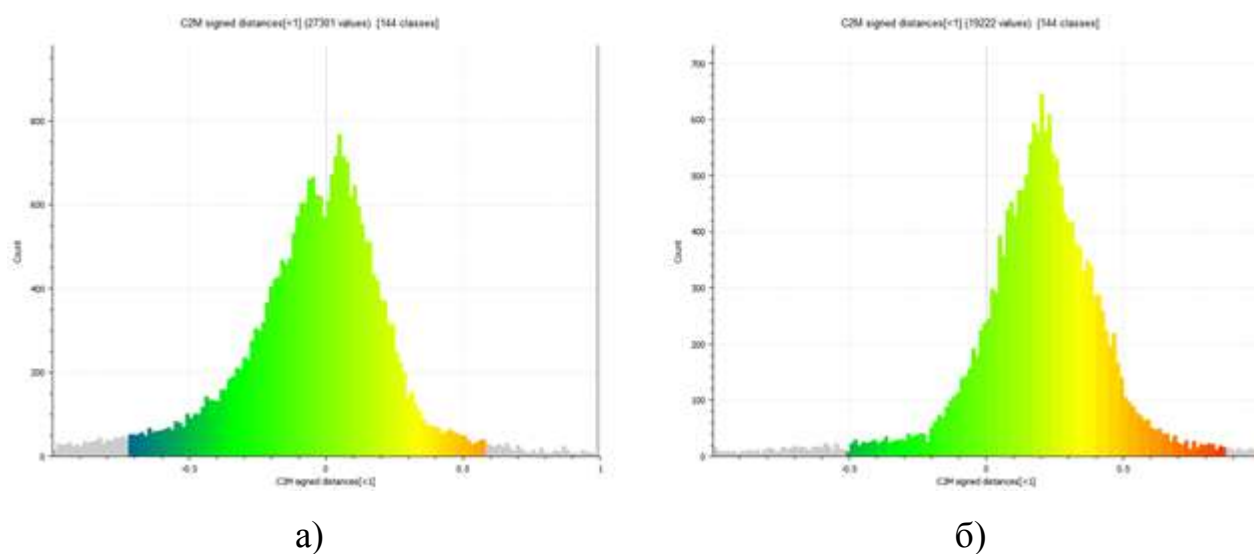


Рисунок 70 - График распределения девиаций моделей верхней (а) и нижней (б) челюстей

При обучении модели ИИ для сегментирования исследуемых структур возникают ошибки, которые устраняются на последующих этапах тренировки модели нейросети. Сравнительный анализ сегментирования ручным и

автоматическим способом доказывает, что автоматическое сегментирование при помощи ИИ дает наилучшую производительность и меньшее количество ошибок.

### 3.4 Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР

Для создания корреляционной модели проводился плановый осмотр пациентов перед или во время ортодонтического лечения. При помощи «Колор-теста №1» определялось наличие воспалительных процессов. Окрашивание происходит за счет реакции повышенного количества гликогена с йодсодержащими растворами. Таким образом в ходе работы участвовали только пациенты без каких-либо признаков воспалительных процессов СОПР, что позволяет создать трехмерные модели мягких тканей и составить объективную цифровую карту СОПР [6].

Данные КТ после сегментации ручным либо автоматическим способом объединялись через референтные модели зубных рядов, к которым изначально были присоединены сегментированные модели мягких тканей.

Метод определения биотипа слизистой с проверкой на наличие воспаления СОПР (рисунок 71 - 90)



Рисунок 71 - РМА «Колор-тест №1»



Рисунок 72 - РМА «Колор-тест №1»

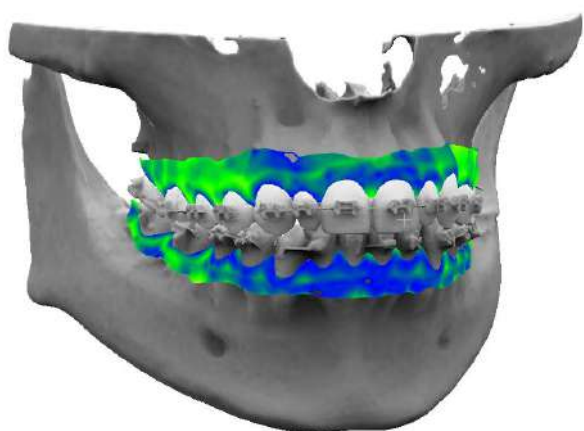


Рисунок 73 - Карта толщины СОПР на трехмерной модели. Средний биотип СОПР

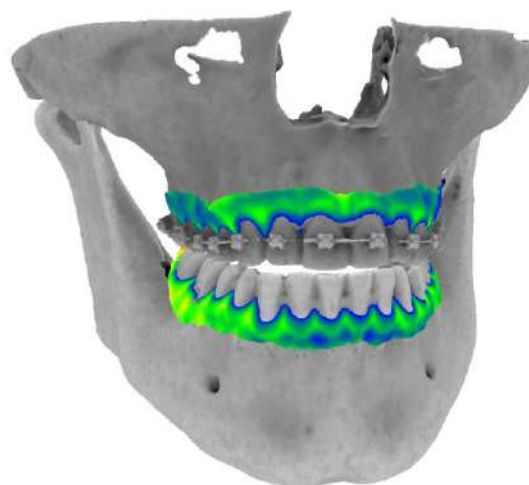


Рисунок 74 - Карта толщины СОПР на трехмерной модели. Средний/толстый биотип СОПР.

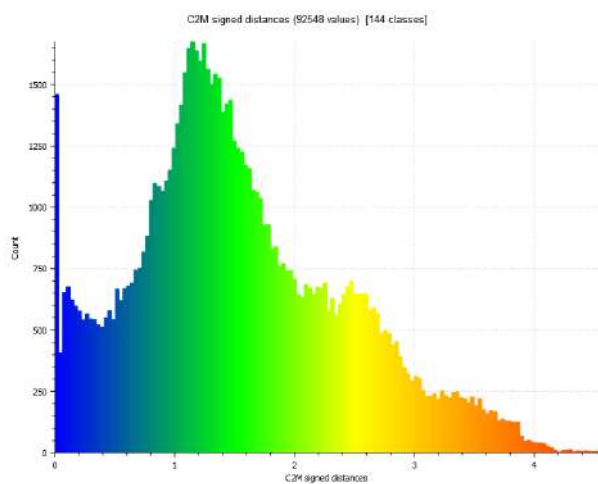


Рисунок 75 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти. Средний биотип СОПР

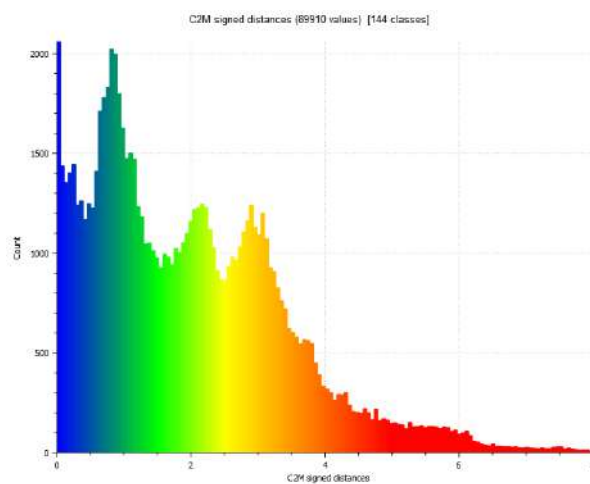


Рисунок 76 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти. Средний/толстый биотип СОПР

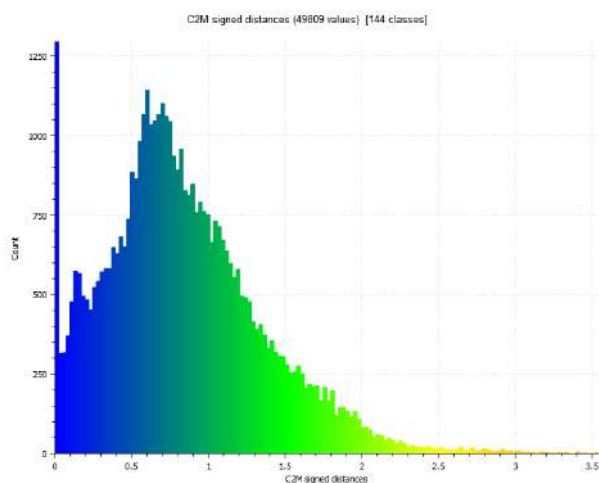


Рисунок 77 - График распределения  
толщины СОПР на нижней челюсти.  
Средний биотип СОПР

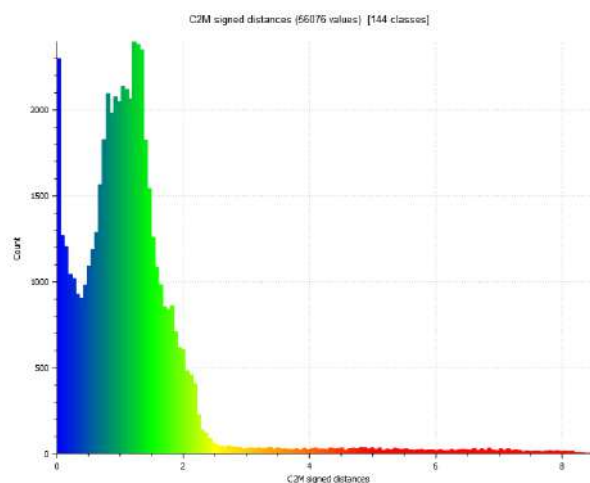


Рисунок 78 - График распределения  
толщины СОПР на нижней челюсти.  
Тонкий биотип СОПР

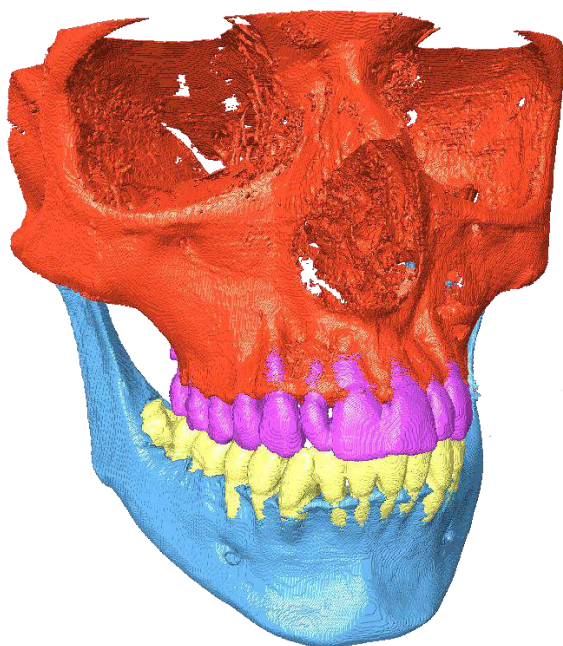


Рисунок 79 - Трехмерная модель  
костных тканей и зубных рядов,  
полученных при помощи ИИ

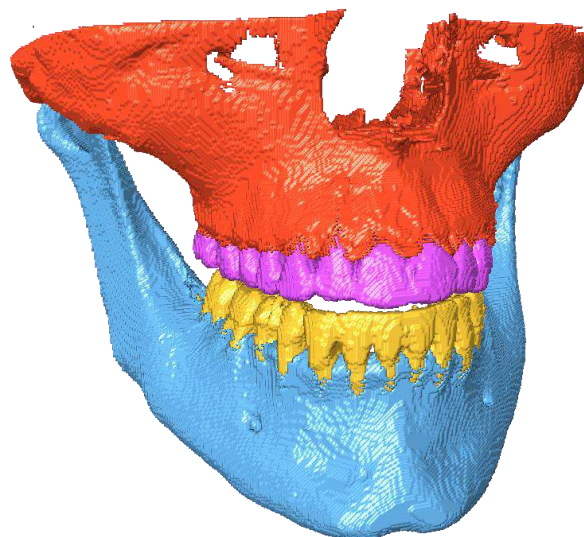


Рисунок 80 - Трехмерная модель  
костных тканей и зубных рядов,  
полученных при помощи ИИ





Рисунок 81 - PMA «Колор-тест №1»



Рисунок 82 - PMA «Колор-тест №1»

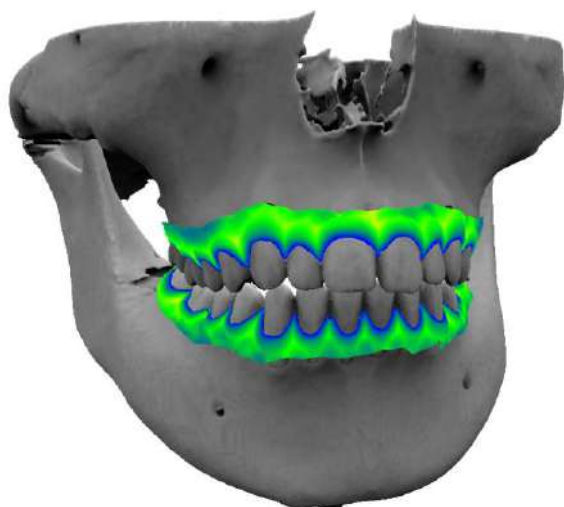


Рисунок 83 - Карта толщины СОПР на трехмерной модели.

Средний/толстый биотип СОПР

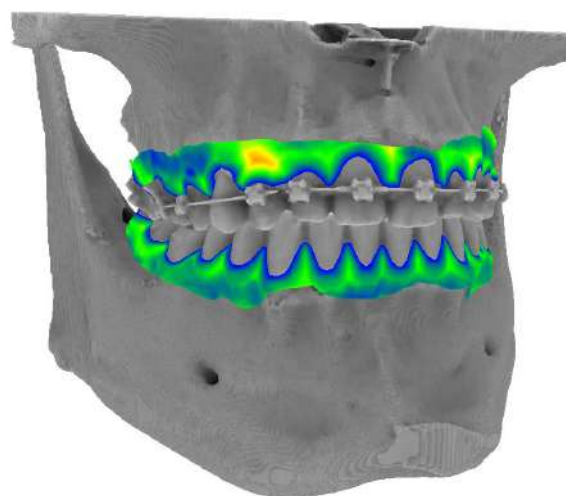


Рисунок 84 - Карта толщины СОПР на трехмерной модели.

Средний/толстый биотип СОПР

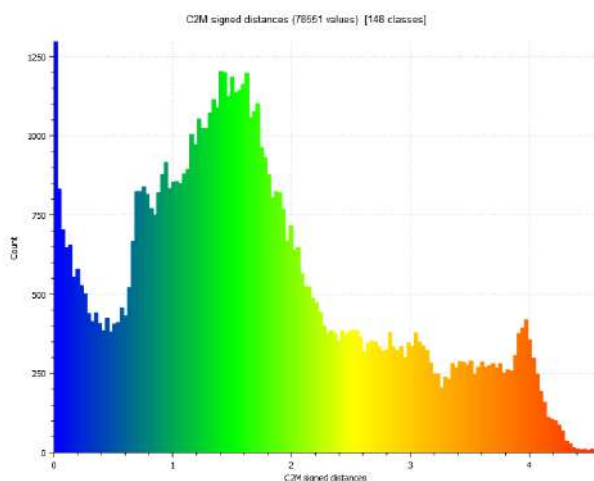


Рисунок 85 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти.

Средний/толстый биотип СОПР

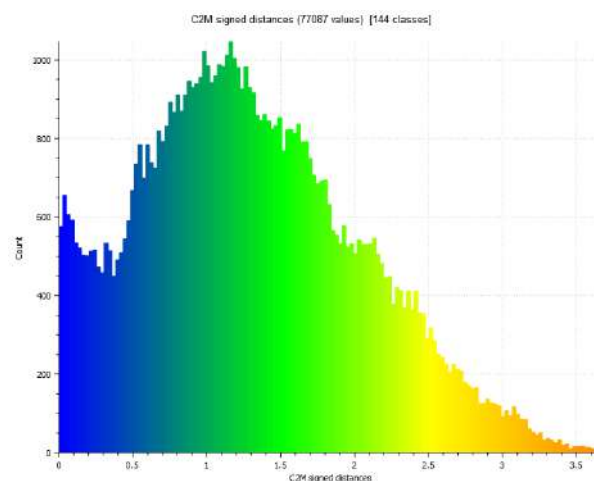


Рисунок 86 - График распределения толщины СОПР на верхней челюсти.

Средний/толстый биотип СОПР

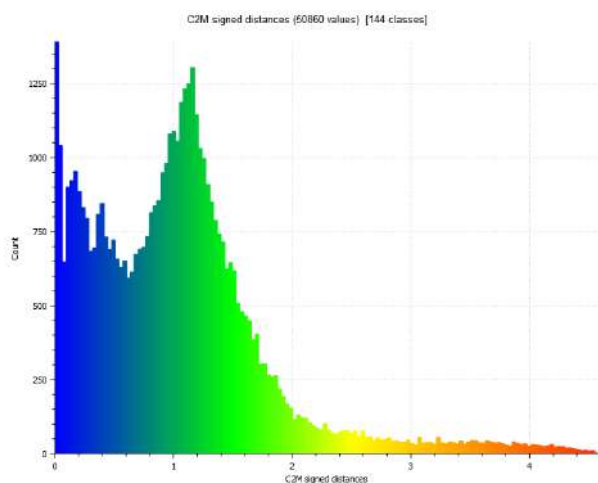


Рисунок 87 - График распределения  
толщины СОПР на нижней челюсти.  
Средний/тонкий биотип СОПР

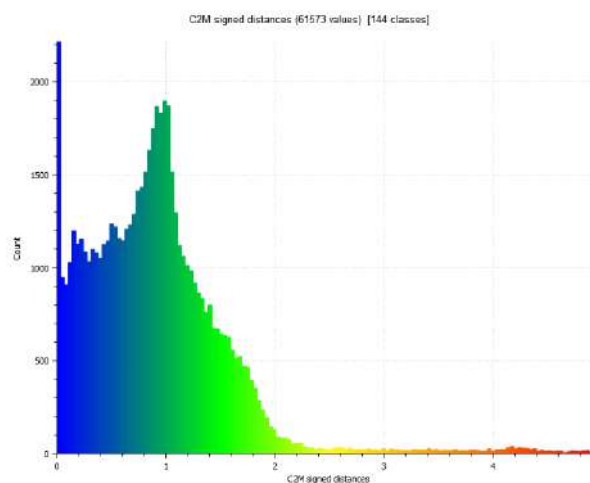


Рисунок 88 - График распределения  
толщины СОПР на нижней челюсти.  
Средний биотип СОПР

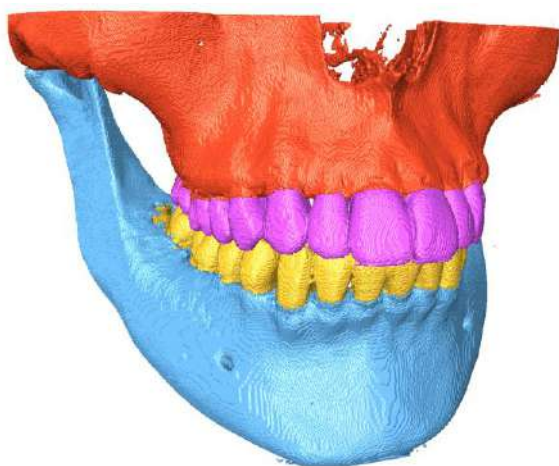


Рисунок 89 - Трехмерная модель  
костных тканей и зубных рядов,  
полученных при помощи ИИ

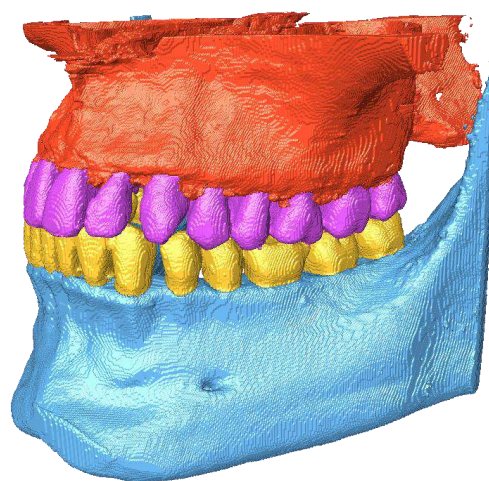


Рисунок 90 - Трехмерная модель  
костных тканей и зубных рядов,  
полученных при помощи ИИ

После сбора данных и создания карты толщины СОПР можно судить о ее объективности не только по общей картине цветовой карты, но и по отдельным частям. Например, в области уздечки верхней губы можно объективно определить необходимость в френулопластике, диагностировать гипертрофию мягких тканей, а на рисунке 84 в области зуба 1.3 виден локальный фиброматоз.

Увеличение количества карт позволяет использовать данную методику по упрощенному алгоритму без использования методик просвечивания зонда или инвазивных методов локального определения биотипа СОПР. Обязательным пунктом объективизации является использование «Колор-теста №1».

«Колор-тест №1» используется для диагностики и оценки степени заболевания пародонта. Проба Шиллера-Писарева окрашивает участки скопления гликогена, содержащегося в воспаленных тканях.

#### Состав и основные свойства

«Колор-тест №1» — диагностический тест, используемый для выявления воспаленных участков полости рта. Тест основан на способности гликогена, который накапливается в воспаленных тканях, окрашиваться йодом. При нанесении теста на воспаленные участки они приобретают характерную окраску.

#### Способ применения

На десневой край наносится жидкость «Колор-тест №1». При наличии воспаления участок десны приобретает цвет от светло-бурого до темно-коричневого. Отсутствие окрашивания свидетельствует об отсутствии воспаления. При наличии воспаления данные не учитывались. В исследовании участвовали только без признаков воспаления СОПР. Таким образом исключалось ошибочное определение биотипа СОПР.



### 3.4.1 Создание корреляционной модели цифровой карты СОПР

Предложена новая удобная и наглядная схема распределения толщины слизистой оболочки полости рта, которую можно оценивать глобально (рисунок 91), рассматривая всю модель, а также локально (рисунок 92).

При применении новой методики протоколы рентгенологических исследований не изменяются.

Большим достоинством предложенной методики является ее неинвазивность. Предложенная методика наглядно показывает полное распределение толщины слизистой по всей поверхности с возможностью виртуального локального зондирования для получения числового значения толщины СОПР.

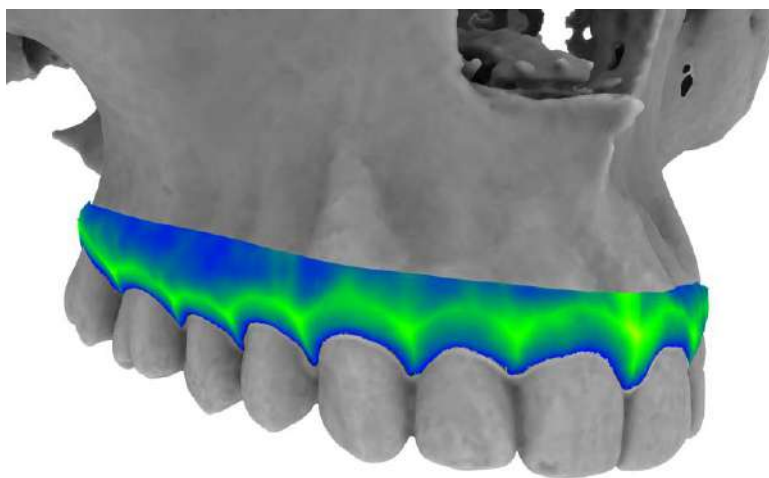


Рисунок 91 - Глобальная карта толщины СОПР на трехмерной модели

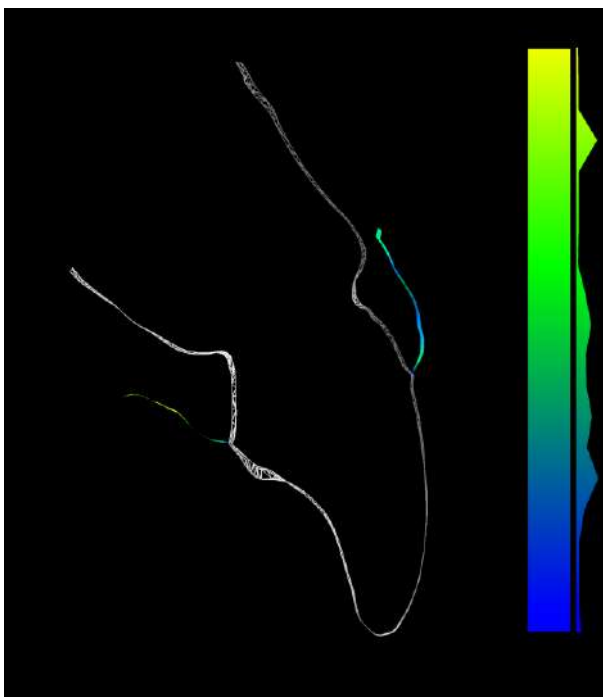


Рисунок 92 - Срез выделенной области костной ткани и СОПР с цветовой картой

### 3.5 Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами

Основные принципы биомеханики опираются на усредненные значения и не учитывают индивидуальных особенностей каждого пациента. В том случае, когда индивидуализация ортодонтического лечения пациента отсутствует, часть физических свойств элайнеров теряется [96]. Для этой цели необходимо получить визуальное отображения деформаций и напряжений в элайнере при помощи расчетов в физико-математических программных пакетах. Полученные результаты используются для оптимизации конструкции элайнера. Однако следует относиться к данным исследованиям критически, так как физико-механические модели упрощены и не учитывают ряда параметров.

При моделировании виртуальной модели элайнеров были взяты физические свойства PET-G материала и внесены в рабочую среду программного обеспечения ANSYS (ANSYS V.18; ANSYS Inc., Канонсбург, США). Свойства гиперпластичности взяты при 22°C из значений, приведенных производителем (Cristal PET-G; Bio-Art, Бразилия). Плотность (1314,8 кг м<sup>-3</sup>) и коэффициент Пуассона (0,31) были взяты из таблицы данных, изотропная эластичность была рассчитана из значений модуля Юнга (2000 МПа) и предела прочности при растяжении (26 МПа) (рисунок 93).

	A	B	C	D	E
	Property	Value	Unit		
	Material Field Variables	Table			
	Density	0,0475	lb in <sup>-3</sup>		
	Isotropic Elasticity				
	Derive from	Young's Modulus an...			
6	Young's Modulus	2E+08	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,4			
8	Bulk Modulus	3,3333E+08	Pa		
9	Shear Modulus	7,1429E+07	Pa		
10	Uniaxial Test Data	Tabular			
11	Scale	1			
12	Offset	0	Pa		
13	Shear Test Data	Tabular			
14	Has Lateral Strain	No			
15	Scale	1			
16	Offset	0	Pa		

Рисунок 93 - Физические свойства PET-G материала

Свойства сетки области контакта были уменьшены на коэффициент глобального размера элементов 0,55 (1,65 мм), был выбран коэффициент размера деформаций (0,05) с функцией захвата кривизны. Свойства сетки, которых не было в области контакта, моделировались более крупными элементами. Размер элемента 3.0 мм был выбран с минимальным размером деталей, который разрешается сеткой (0,5 мм) и мягким поведением.

Характеристики физических свойств материалов, которые не были указаны производителем, были взяты из данных научных исследований [60, 92]. В связи с тем, что табличных значений ни в литературе, ни у производителя материалов указано не было, данные были обработаны через интеллектуальный трассировщик данных Easy Trace Pro (Easy Trace Group, Россия).

Был создан проект на основе растрового файла графика (рисунок 94), заданы единицы измерения и начала координат, общее расстояние в пикселях по осям x и y.

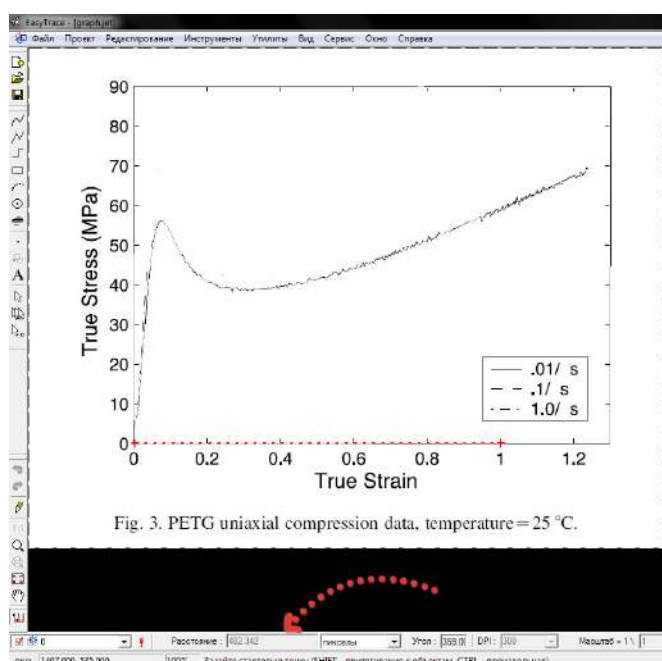


Рисунок 94 - Обработка растровых данных из научных статей в табличные значения

Далее следовала трассировка линии графика и преобразование в табличный формат (рисунок 95, 96)

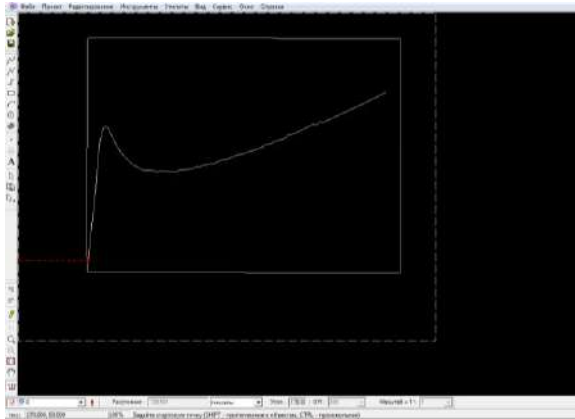


Рисунок 95 - Трассировка данных графика по выбранному цвету

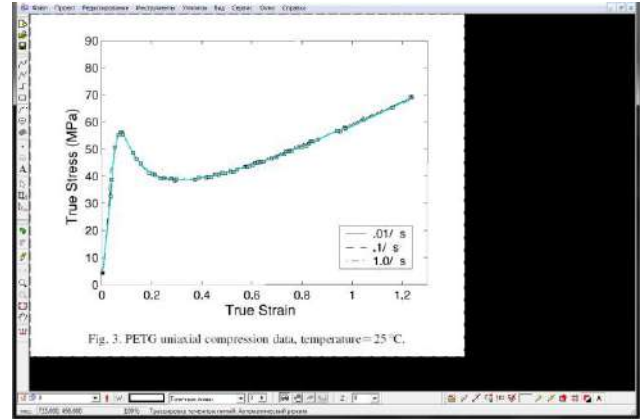


Рисунок 96 - Наложение трассировки графика

Полученные данные трассировки были преобразованы в табличные значения и скорректированы относительно нулевого положения в программном обеспечении LibreOffice Calc, (рисунок 97) затем построен график для проверки корректности трассировки и расчетов (рисунок 98).

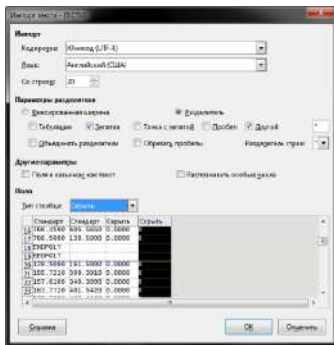


Рисунок 97 - Фильтр табличных данных

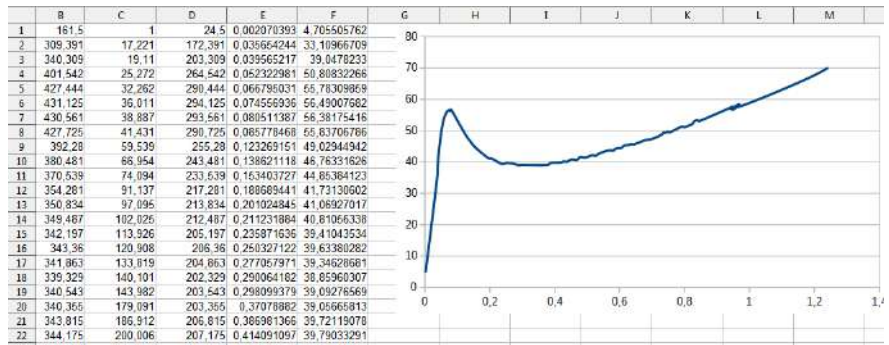


Рисунок 98 - Коррекция исходных данных после обработки и получение графика

Полученные данные были перенесены в рабочую среду ANSYS (рисунок 100) и в раздел свойств материалов виртуальных моделей элайнеров.

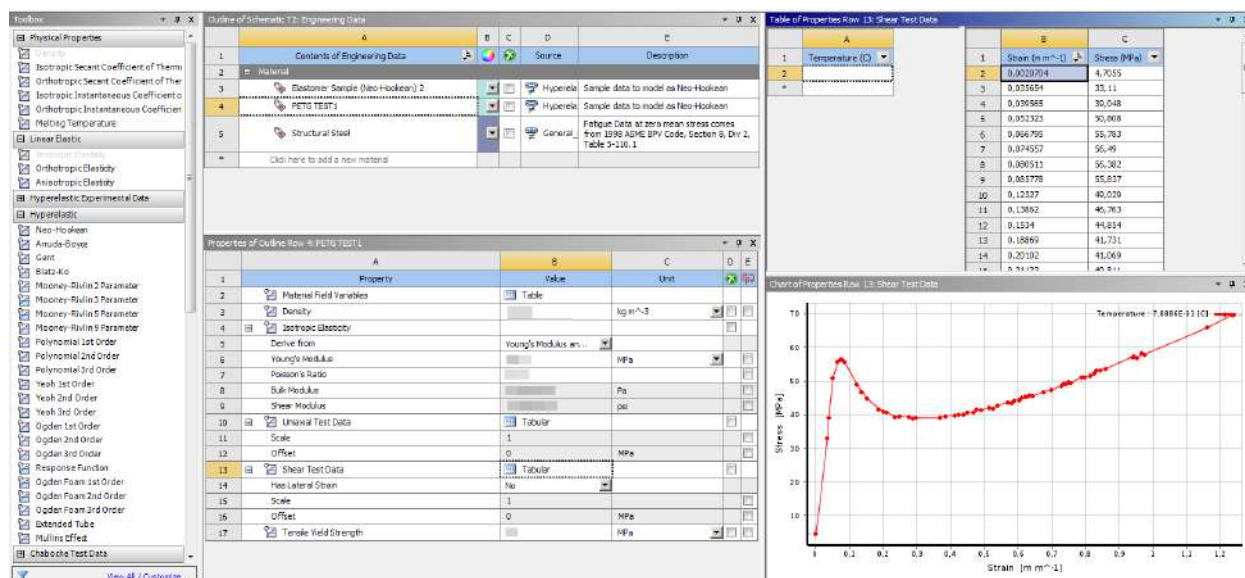


Рисунок 99 - Добавление данных о характеристиках материала в инженерный конструктор программного обеспечения ANSYS

Для данного исследования было проведено сканирование полости рта пациентов при помощи интраорального сканера Planmeca Emerald™ (Planmeca, Хельсинки, Финляндия), и созданы трехмерные модели зубных рядов (рисунок 100).

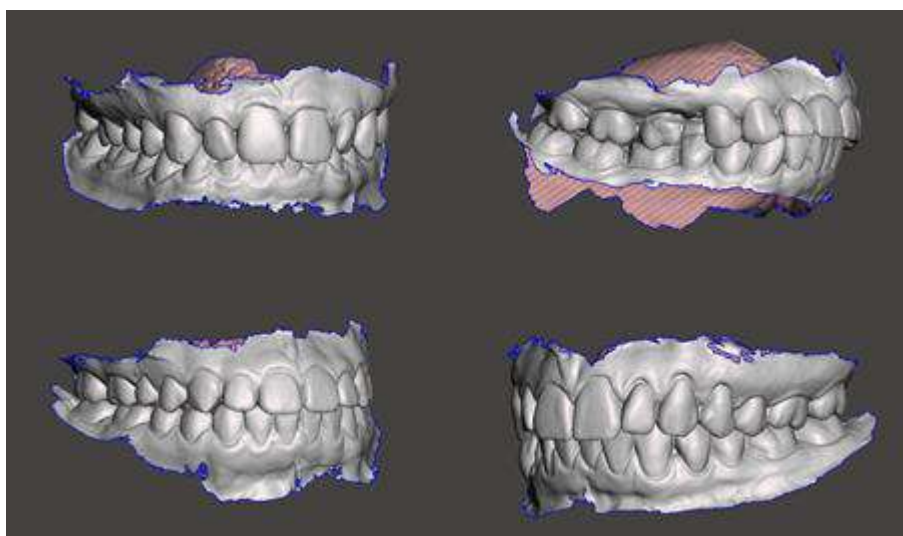


Рисунок 100 - Трехмерные модели зубных рядов, полученные при помощи интраорального сканера

Из общего числа были отобраны пациенты с различными протоколами лечения на элайнерах. Для каждого было проведено виртуальное планирование в программном обеспечении Maestro 3D Ortho Studio (AGE Solutions, Понтедера, Италия) (рисунок 101).

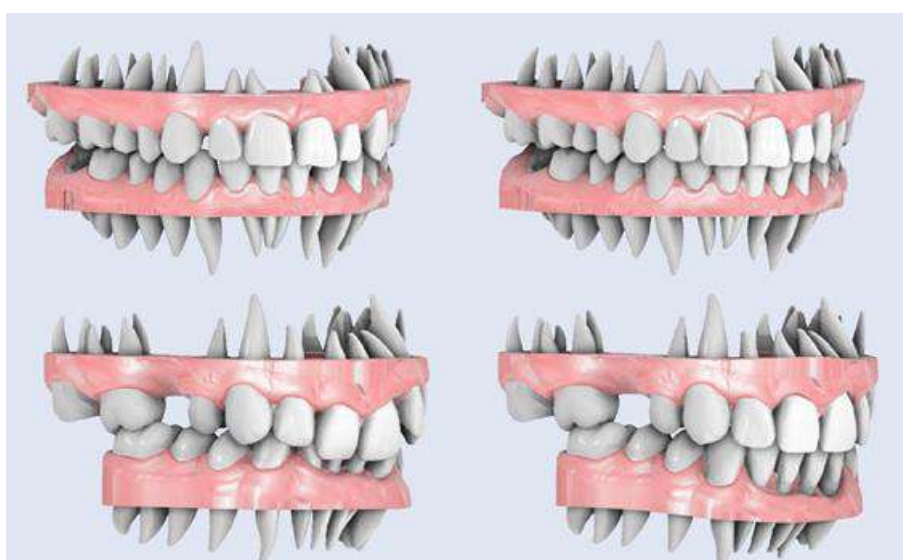


Рисунок 101 - Составление плана лечения в программном обеспечении Maestro Ortho Studio V5



Исходные модели были предварительно обработаны, и исправлены ошибки оболочек трехмерных моделей в программном обеспечении Autodesk Meshmixer (Autodesk Inc., Сан-Рафаэль, Калифорния). Виртуальные модели элайнеров были созданы методом экструзии толщиной 1 мм и сглаживанием нависающих краев (рисунок 102, 103).

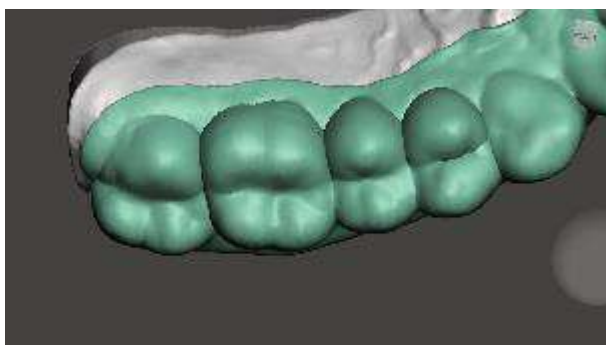


Рисунок 102 - Экструзия выбранной виртуальной модели элайнеров на 1 мм

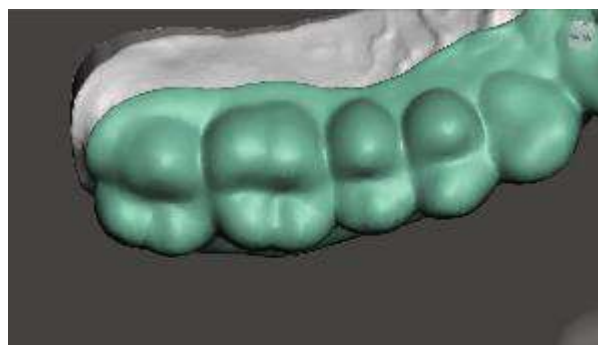


Рисунок 103 - Сглаживание нависающих краев виртуальной конструкции элайнера

Промежуточные этапы «до» и «после» взяты за основу при виртуальном моделировании элайнеров (рисунок 104).



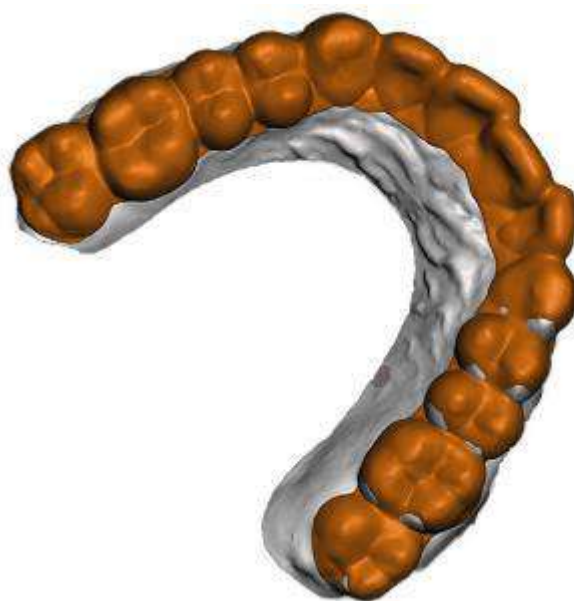


Рисунок 104 - Модель элайнера с необходимым перемещением (сверху) и начальная модель зубного ряда (снизу).

Для ускорения подсчета математической модели проведены операции упрощения моделей на определенных участках, не участвующих в работе элайнеров. Размеры элементов были подобраны с учетом важности топологии анатомии и с максимально возможным общим количеством элементов виртуальной сетки, которое могло быть подсчитано программным пакетом (рисунок 105, 106) [97, 198].

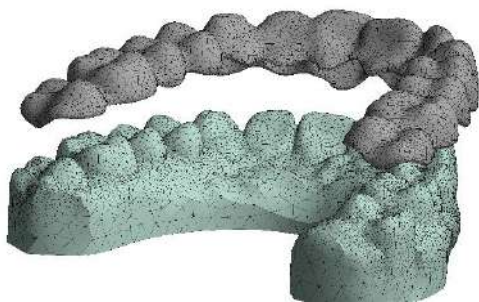


Рисунок 105 - Общий вид модели и вид элементов

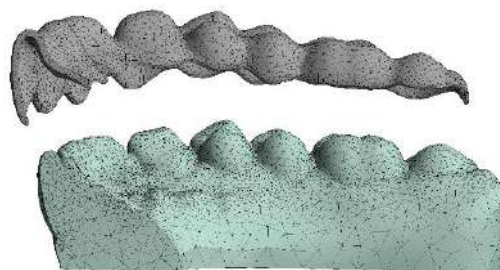


Рисунок 106 - Срез сборной модели и вид размеров элементов

Контактная поверхность на базовой модели была увеличена для случая возможного пересечения со скользящей моделью элайнера (рисунок 107 - 109).



Рисунок 107 - Контактная поверхность элайнера

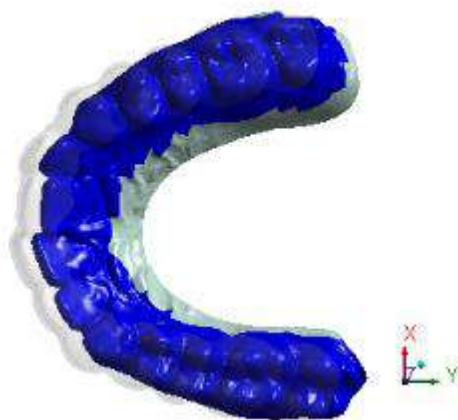


Рисунок 108 - Контактная поверхность модели зубного ряда

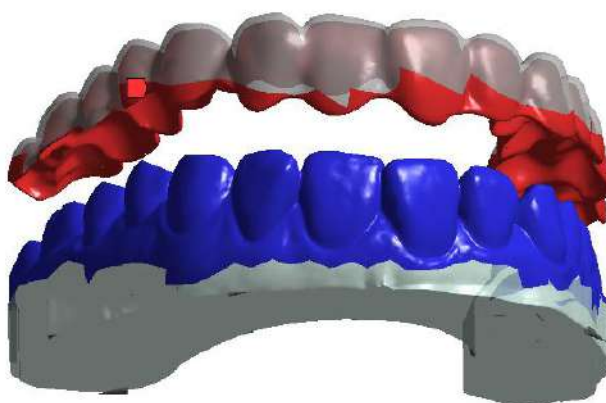


Рисунок 109 - Контактные поверхности элайнера и зубного ряда.

То есть разработана новая методика посадки элайнера с учетом его обрезки и форм зубных рядов. В новой методике движения как элайнера, так и зубного ряда подобраны таким образом, чтобы края конструкции элайнера не деформировались от контакта с моделью зубных рядов, а модель создавала реальную траекторию,

посадки элайнера на зубные ряды (рисунок 110). Ни один из приведенных ранее в литературе методов моделирования нагрузки не подходил для данной задачи.

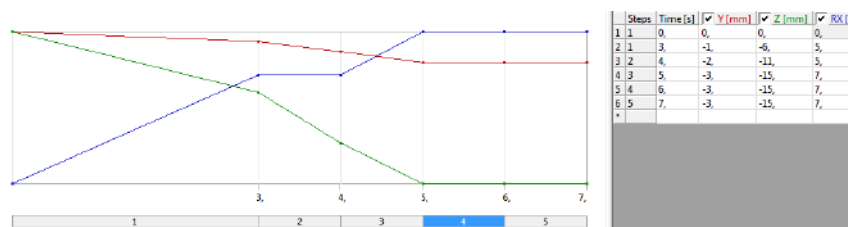


Рисунок 110 - Движения модели зубного ряда при совмещении с конструкцией элайнера. Красная линия – движения по оси Y, зеленая линия – движения по оси Z, синяя линия – ротация по оси X.

На элайнер была приложена кратковременная сила (10 Н) на отметке 6 сек по всей поверхности для равномерного распределения нагрузки и затем удалена. Таким образом была получена нагрузка в элайнере, припасованном на зубной ряд (рисунок 111).

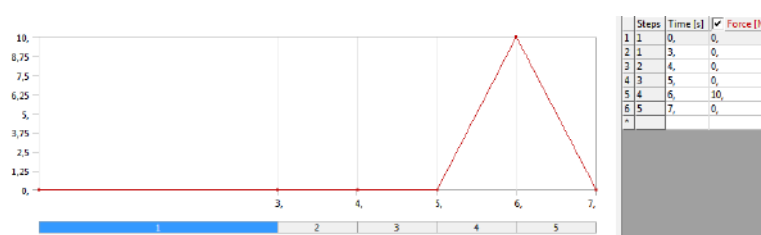


Рисунок 111 - Кратковременное приложение силы на отметке 6 сек

Общий вектор движений и нагрузок представлен на рисунке 112, показывающий векторы движений и ротации обеих моделей.

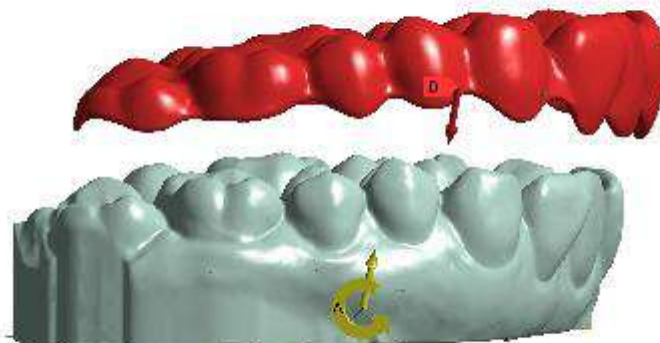


Рисунок 112 - Общий вектор движений элайнера и зубного ряда

### 3.5.1 Реверсивное моделирование

Для анализа топологии элайнера с эстетической компонентой были разработаны и проанализированы различные виды балочных соединений, подходящих под модификацию с эстетической компонентой. Дизайн исследования с физическими параметрами элайнера и базовая модель зубных рядов были взяты из уже разработанного и модифицированы под необходимую задачу для каждого клинического случая.

Корпусное перемещение зуба дистально с отрицательным типпингом сравнивалось с аналогичным движением зуба с заданным шагом для различных топологий конструкций элайнеров.

Для исследуемого контрольного набора элайнеров с целью получения усиления конструкции и увеличения эластичности был выбран стандартный тип балочного соединения и проведен анализ на предмет деформаций, стресса и напряжения в конструкции.

Для эффективного и быстрого создания дизайна математической модели, подходящей под цели и задачи создания расчетов балочной конструкции и ее

модификации эстетическим понтиком, был выбран подход моделирования симуляции с выполнением перемещения зубов на шаг вперед, путем перемещения зубов, а не модели элайнера (рисунок 113).

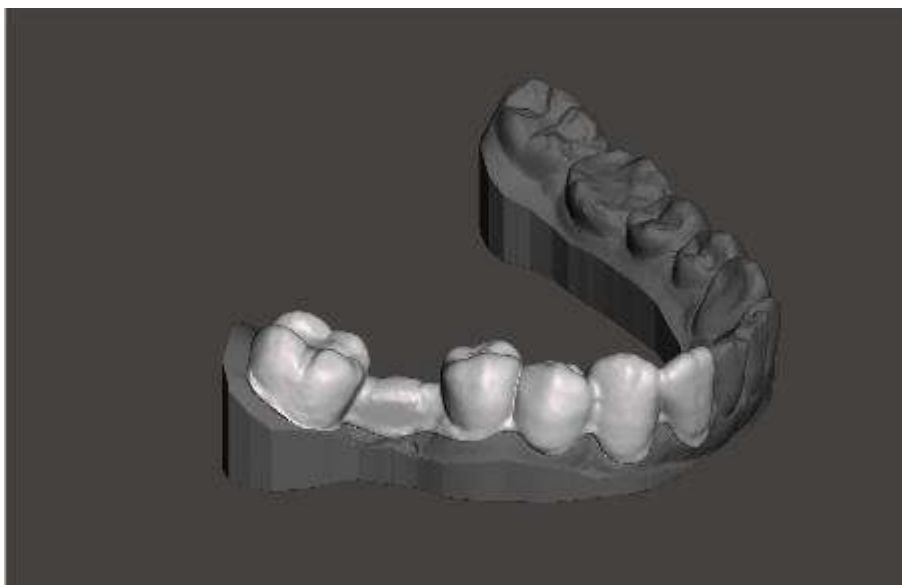


Рисунок 113 - Создание частичной виртуальной модели элайнера с балочным усилением

Смоделированные части конструкции были обработаны в программе ANSYS mechanical для дальнейшего анализа (рисунок 114).

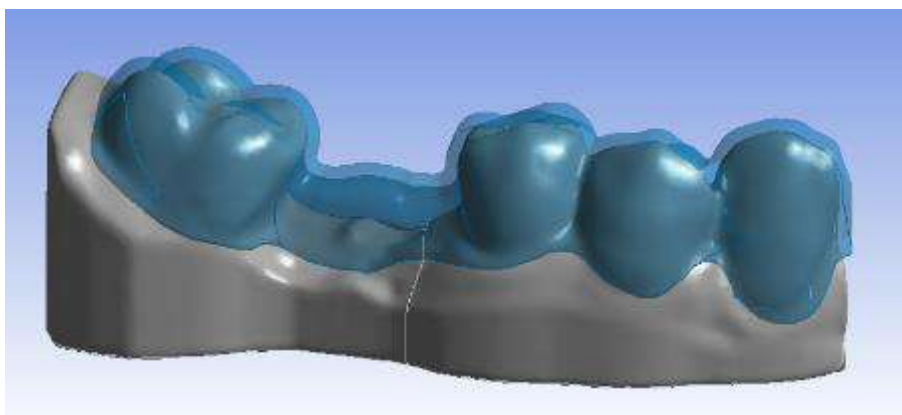


Рисунок 114 - Виртуальная оболочка части элайнера с балочным усилением

В сравнительный набор элайнеров были включены стандартные клинические решения с учетом эстетики, для чего был создан понтик в области, где непосредственно отсутствовал зуб (рисунок 115).

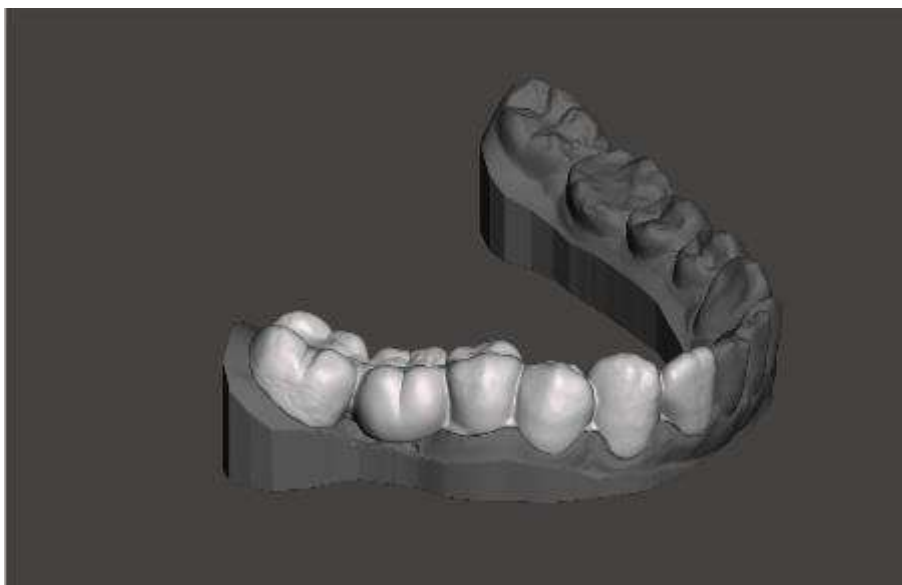


Рисунок 115 - Создание частичной виртуальной модели элайнера с эстетическим ПОНТИКОМ

Полученные модели были обработаны в программном обеспечении Ansys Mechanical и проведены расчеты нагрузки и деформаций (рисунок 116).

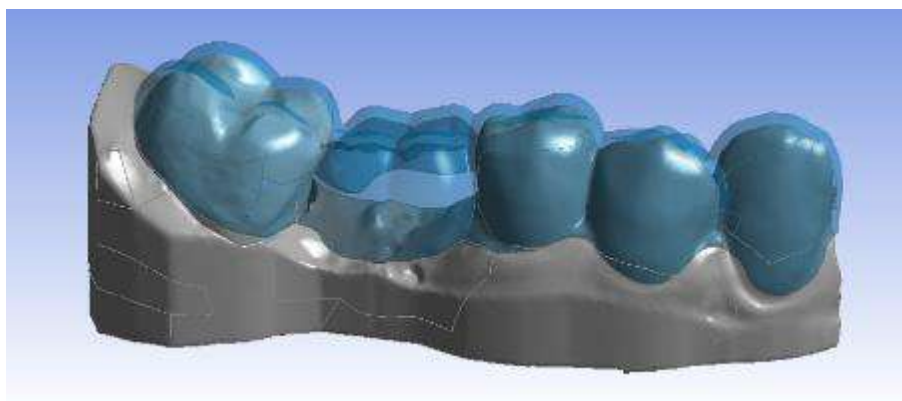


Рисунок 116 - Виртуальная оболочка части элайнера с эстетическим понтиком

Для реверсивного дизайна была создана индивидуальная модель зуба с заложенным шагом перемещения, и с таким же шагом были движения в модели анализа (рисунок 117).

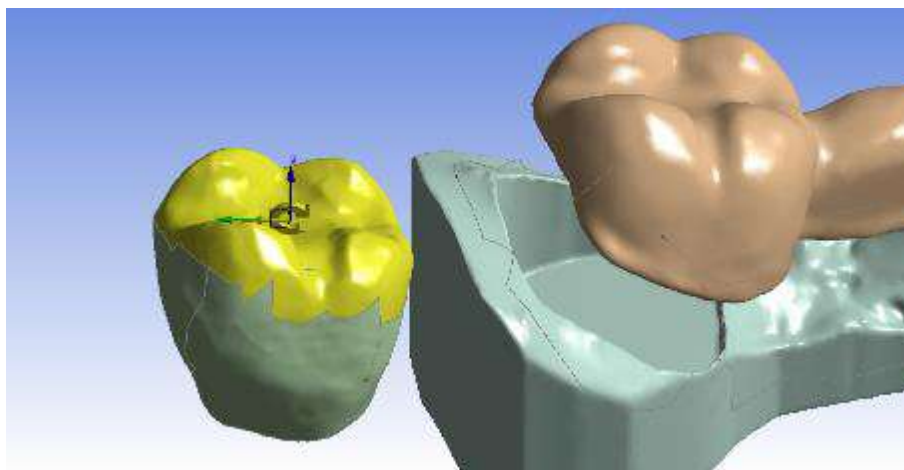


Рисунок 117 - Реверсивное моделирование передвижения зуба (дистализация и дистальный наклон)

Математический анализ конечными элементами показал слабые стороны обеих конструкций, но с другой стороны показал возможности их модификации по усилению. В случае с балочным усилением заметны большие деформации на изгиб на относительно небольшой поверхности, что показывает малую эффективность передачи ортодонтических сил и стадию возможного разрушения конструкции (рисунок 118).

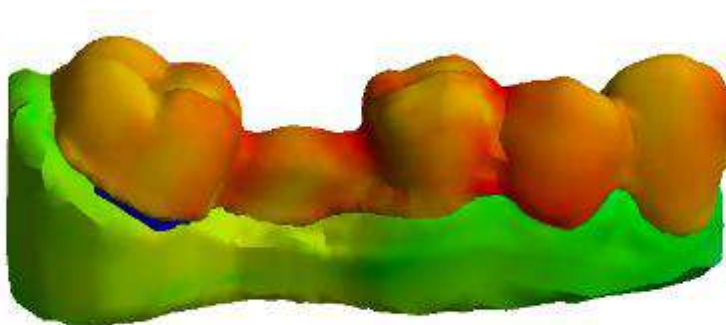


Рисунок 118 - Упругая деформация сдвига с балочным усилением



При использовании понтика нагрузка передается по большей площади и более равномерно распределяется по конструкции элайнера, однако избыточная пластичность такого решения приводит к неплотному прилеганию элайнера к поверхностям зубов и опорных аттачментов (рисунок 119).

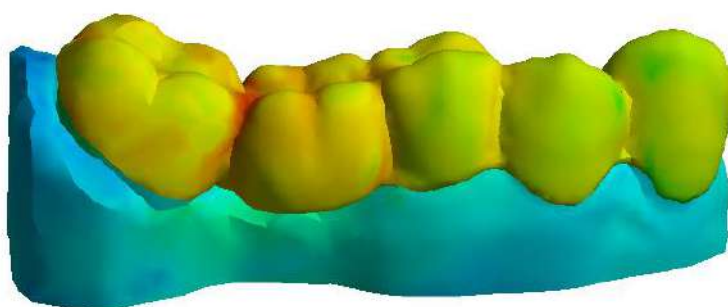


Рисунок 119 - Упругая деформация сдвига с понтиком

По данным результатов анализа конечными элементами были выявлены основные минусы обеих конструкций.

В первой конструкции с использованием понтика при активации элайнера происходит сжатие в мезио-дистальном направлении, что приводит к деформации и расширению в вестибуло-оральном направлении не только в области отсутствующего зуба, но еще и в области соседних зубов. В свою очередь это приводит к тому, что при наличии такой деформации, элайнер неплотно прилегает в области аттачментов, что может быть причиной потери опоры на эти дополнительные элементы, а это приводит к отклонению от запланированных шагов лечения и к появлению необходимости коррекции (рисунок 120).



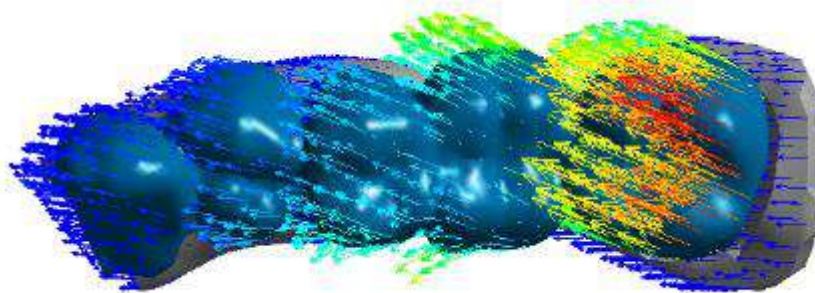


Рисунок 120 - Векторы деформации элайнера с эстетическим понтиком

Во второй конструкции, когда используется стандартное решение (балочное соединение), происходит избыточная нагрузка на слизистую, что в свою очередь может привести к нарушению заживления раны в месте удаления зуба и к нарушениям микроциркуляции в десне в месте избыточного давления от конструкции лайнера (рисунок 121, 122).

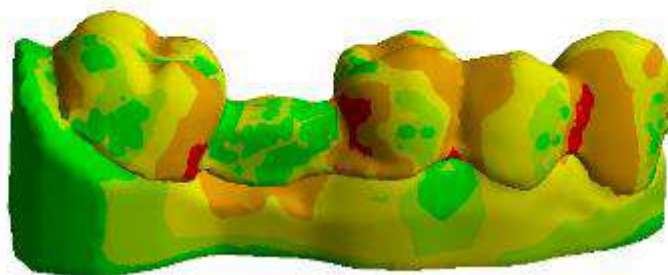


Рисунок 121 - Нагрузка на слизистую с балочным соединением в области зуба 46

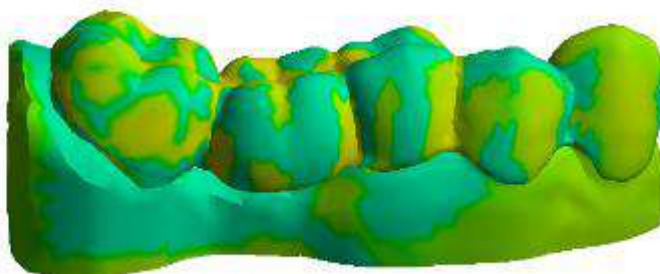


Рисунок 122 - Нагрузка на слизистую с понтиком в области зуба 46

Исходя из анализа конструкций типа «балка» и «понтик», было решено провести их модификацию. То есть получить новую конструкцию, которая включала бы как эстетику, так и функции обоих типов соединений. Такое решение позволило снять нагрузку с десны в области утраченного зуба и не нарушить силовую конструкцию элайнера, помимо этого, улучшить эстетическую составляющую конструкции, что, как правило, приводит к повышению мотивации пациента в процессе лечения.

### **3.5.2 Доклиническое моделирование передвижения зубов**

Опираясь на результаты расчётов конечными элементами, можно сделать вывод, что топология элайнера сильно влияет на его сопротивление деформациям. Непредвиденные деформации в элайнере перенаправляют силы с боковых поверхностей конструкции на окклюзионную поверхность, что в свою очередь влияет на предсказуемость лечения и может привести к отклонению от начального виртуального плана лечения, а также к необходимости дополнительных коррекций во время клинического приема.

Исходя из визуального анализа полученных данных, можно сделать вывод о зонах наибольшей напряженности конструкции, ее физических свойствах и давлении (приложенных силах) на каждый зуб в отдельности и всю дугу в целом. Визуализация напряжений в конструкции элайнера помогает определить оптимальную форму обрезки в определенных местах, индивидуальных для каждого клинического случая, а также увеличить прочность конструкции, ее устойчивость к износу, появлению микротрещин и поломок (рисунок 123, 124).

Визуализация данных о напряжении, возникающем в конструкции элайнера при активации, дают полный контроль над нагрузкой на зубы, распределением ортодонтической силы и направлением ее на каждый зуб, участвующий в движении и анкорраже (рисунок 125, 126).

Исследования показали, что при усилении конструкции дополнительным материалом PET-G в наиболее нагруженных зонах обеспечивается лучшая структурная стабильность и уменьшаются избыточные деформации. Поскольку избыточные деформации вызывают неправильное приложение сил к передвигаемым зубам в дополнение к слабому распределению сил на опорных зубах. Недостаточная устойчивость элайнера к избыточным деформациям приводит к неправильному распределению сил на зубной ряд и отклонениям от запланированных перемещений зубов.

Доклиническое моделирование передвижения зубов показало, что в сложных клинических случаях необходим индивидуальный подход к процессу ортодонтического лечения для создания модифицированной топологии элайнеров. Таким образом, проведение подобных расчётов позволяет модифицировать элайнеры и тем самым сократить время лечения по сравнению со временем лечения при помощи стандартных элайнеров. А при длительном сроке лечения потребуется лишь небольшая коррекция или вовсе ее не потребуется. Элайнеры с прямой обрезкой обладают относительно большей устойчивостью к деформациям и

сохраняют первоначальную форму; в результате к зубам прикладываются расчетные силы. Лучшее распределение сил наблюдалось при использовании элайнера с прямой обрезкой, силы были направлены на боковые поверхности зубов, тогда как при обрезке элайнера по десневому краю наблюдались небольшие деформации, и силы были перенаправлены на окклюзионную поверхность.



Рисунок 123 - Эластичная деформация элайнера с обрезкой по десневому краю



Рисунок 124 - Эластичная деформация элайнера с прямой обрезкой

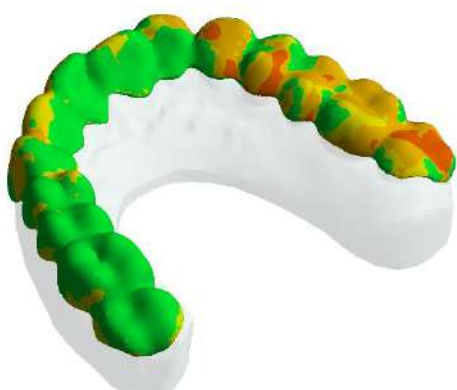


Рисунок 125 - Напряжение сдвига элайнера с обрезкой по десневому краю



Рисунок 126 - Напряжение сдвига элайнера с прямой обрезкой

Топология элайнеров с прямой обрезкой в сравнении с обрезкой по десневому краю демонстрирует перераспределение эластичной деформации и дальнейшее правильное распределение сил, прикладываемое на зубы.

Доклиническое моделирование передвижения зубов позволяет в сложных клинических случаях получить оптимальные варианты модификаций элайнеров. Такой способ модификации и оптимизации изготовления элайнеров чрезвычайно важен и актуален в современной ортодонтии. Вычислительная мощность конечно-элементного анализа позволяет моделировать физические свойства элайнеров, которые были предсказаны только теоретически, без учета индивидуализации. Некоторые виртуальные упрощения не влияют на результат или их рассмотрение выходит за рамки оценочно-диагностических требований. Неравномерная толщина виртуальных элайнеров была изменена вручную, чтобы имитировать поведение реального аппарата (толщина виртуальных моделей была скорректирована после измерения боковых стенок реальных элайнеров (рисунок 127, 128)). Однако следует учитывать и другие физико-химические свойства, снижающие прочность элайнеров. Исследование было проведено с целью достижения четкого понимания, как можно модифицировать элайнеры, чтобы сократить время лечения и улучшить контроль. На виртуальных моделях была продемонстрирована необходимость применения в лечении индивидуального подхода, а не использование стандартных протоколов с одним видом обрезки элайнеров.



Рисунок 127 - Неравномерная толщина элайнера в переднем отделе

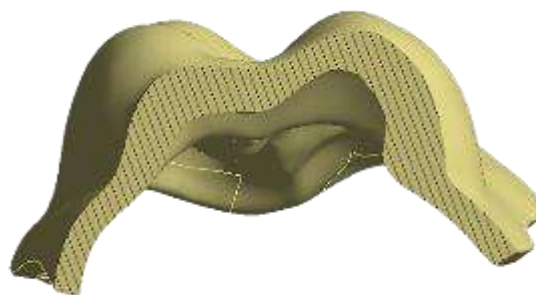


Рисунок 128 - Неравномерная толщина элайнера в боковом отделе

Толщина боковых стенок моделей элайнеров была вручную уменьшена, чтобы воссоздать лучшее физическое поведение во время анализа конечными элементами.

Элайнеры с прямой обрезкой показали лучшую стабильность и предсказуемость по отношению к запланированным моделям на каждом этапе. При обрезке по десневому краю конструкция сильно деформируется при начальной активации и плохо распределяет давление на зубы, что приводит к отклонению от запланированных в виртуальном сетапе шагов.

Предложенные в литературе варианты построения математических расчётов не подходили для выполнения поставленных задач. В результате анализа был сделан вывод, что упрощения в виртуальных моделях не влияют на общую картину и ее демонстрацию для понимания процесса распределения сил, деформаций и напряжений в конструкции.

Доклиническое моделирование передвижения зубов показало, что элайнеры с фестончатым вырезом могут деформироваться, что приводит к изменению направления движения зубов. Это, в свою очередь, вызывает отклонение от плана лечения и приведет к необходимости его корректировки. Элайнеры с фестончатым вырезом деформируются в областях с наименьшим количеством материала либо в

наиболее толстой области, что может остаться незамеченным ортодонтом. Чтобы избежать этого, необходимо провести доклиническое моделирование, а интересующие области должны быть усилены дополнительным материалом РЕТ-Г.

Был проведен сравнительный анализ деформированных моделей элайнеров с прямой обрезкой и обрезкой по десневому краю (рисунок 129). Элайнеры с обрезкой по десневому краю показали меньшую устойчивость к деформациям. Силы, направленные на окклюзионную и боковые поверхности зубов, перпендикулярно окклюзионной плоскости, имитировали наличие аттачментов с равномерной площадью крепления по всей поверхности. Данное упрощение модели было сделано для исключения возможных дополнительных деформаций, возникающих от аттачментов, при анализе топологии элайнеров в определенных местах интереса и для создания возможности обобщения математической модели.

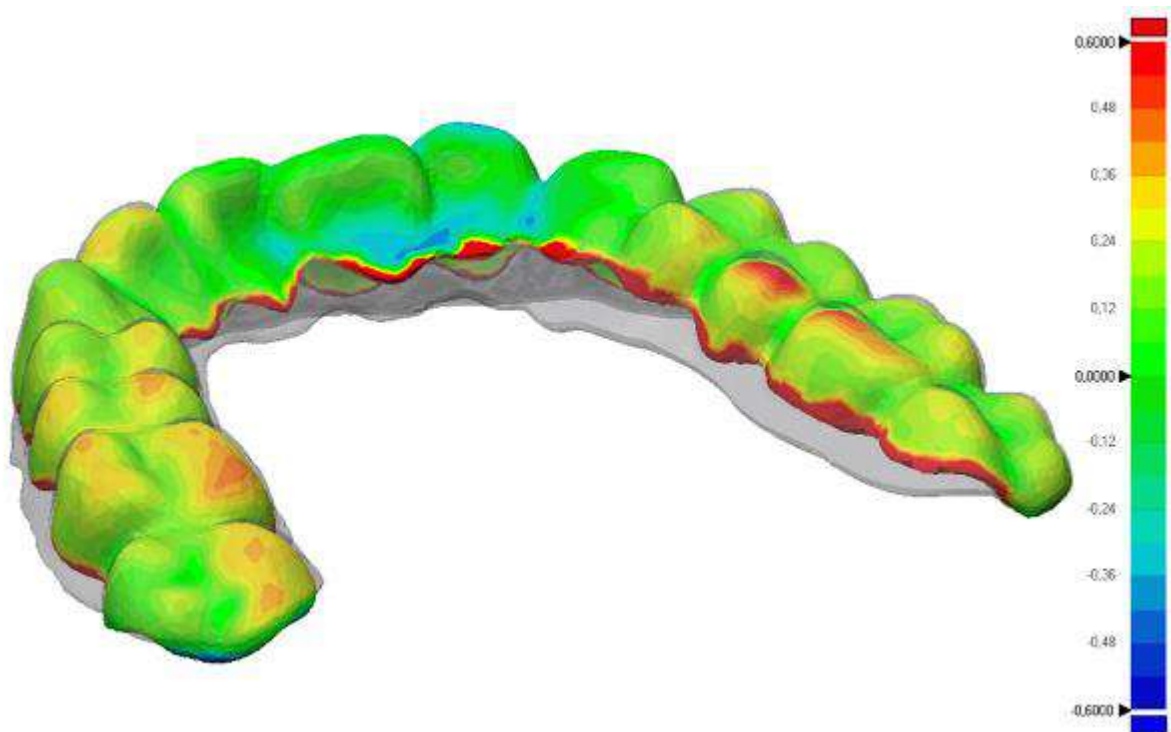


Рисунок 129 - Карта девиаций, показывающая разницу деформаций между фестончатой обрезкой и обрезкой по десневому краю



### 3.5.3 Создание трехмерных моделей для анализа конечными элементами

Используя полученные интраоральным сканером трёхмерные модели зубных рядов, были составлены виртуальные планы лечения, и на их основе созданы виртуальные модели элайнеров. Данный комплекс был помещен в среду ANSYS, в которой была сформирована архитектура расчетов деформаций элайнеров (рисунок 130). Разработанная таким образом архитектура позволяет помещать в нее трехмерные модели зубных рядов и элайнеров без повторного создания условий и быстро получать результаты анализа конечными элементами (рисунок 131).



Рисунок 130 - Архитектура математических моделей в рабочей среде Ansys



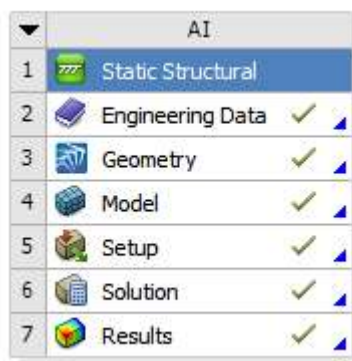


Рисунок 131 - Частная архитектура математической модели САПР

Разработан новый оригинальный дизайн математических моделей ортодонтических элайнеров, отличный от дизайна, используемого другими исследователями, и не описанный ранее в литературе. Разработанный базовый алгоритм дизайна подвергался модификациям для каждого клинического случая отдельно. Эффективность модифицированных элайнеров определялась степенью деформаций и распределением нагрузки на всю конструкцию элайнера.

При помощи системы автоматизированного проектирования были получены расчеты деформаций элайнеров, представлены карты распределения нагрузок и деформаций. Такая визуализация наглядно показала те области конструкции элайнеров, которые нуждаются в усилении.

Опираясь на полученные результаты математического анализа, получили обоснование методики применения фестончатой и прямой обрезки элайнеров в зависимости от биотипа десны. При тонком биотипе десны используется фестончатая обрезка применяемых элайнеров. Элайнеры усиливаются высокой обрезкой в местах, требующих активного перемещения отдельных зубов (тракция, мезио-дистальные перемещения, ротации).

Проведен сравнительный анализ существующих стандартных методик изготовления ортодонтических элайнеров с дополнительным уменьшением краев обрезки в тех случаях, когда есть изменения пародонта.

Полученные данные свидетельствуют о следующих результатах исследования:

- 1) Важна индивидуализация обрезки элайнеров в соответствии с клинической ситуацией и определенным биотипом десны.
- 2) Необходима модификация балочных элементов элайнеров с применением эстетических фасадных понтиков.
- 3) Достигнуто увеличение прочности конструкции за счет модификации топологии элайнеров.
- 4) Увеличена эффективность ортодонтического лечения на элайнерах.
- 5) Достигнуто уменьшение количества ревизий при лечении на элайнерах.
- 6) Достигнуто улучшение эстетической составляющей без компромисса прочности.
- 7) Получена оптимизация топологии элайнеров без потери их функций.
- 8) Разработана концепция моделей для анализа в САПР.
- 9) Обработаны трехмерные модели отсканированных зубных рядов.
- 10) Созданы виртуальные модели элайнеров с измененной топологией.
- 11) Разработан дизайн математического исследования в инженерном программном обеспечении.
- 12) Проведена обработка и оптимизация трехмерных моделей для работы в САПР.
- 13) Были подобраны свойства материалов для элайнеров с определенными физическими свойствами, которые были использованы в практической части исследования. По данным разных источников были установлены их физико-химические коэффициенты. Далее эти данные были импортированы в рабочую среду инженерного программного обеспечения Ansys.

- 14) Проведены расчеты различных вариантов модификаций топологии элайнеров для каждого пациента.
- 15) Сделаны выводы по изменению и улучшению топологии элайнеров в каждом клиническом случае.
- 16) Разработаны общие характеристики модификации топологии элайнеров в схожих клинических случаях.

### 3.6 Клинико-лабораторные методы

Разработка плана лечения проводилась в программном обеспечении Maestro Ortho Studio V5 с учетом поставленных клинических целей и задач. Представлен пример разработки плана лечения по выбранным критериям, в котором возможно применение оптимизации и улучшения топологии набора элайнеров (рисунок 132, 133).

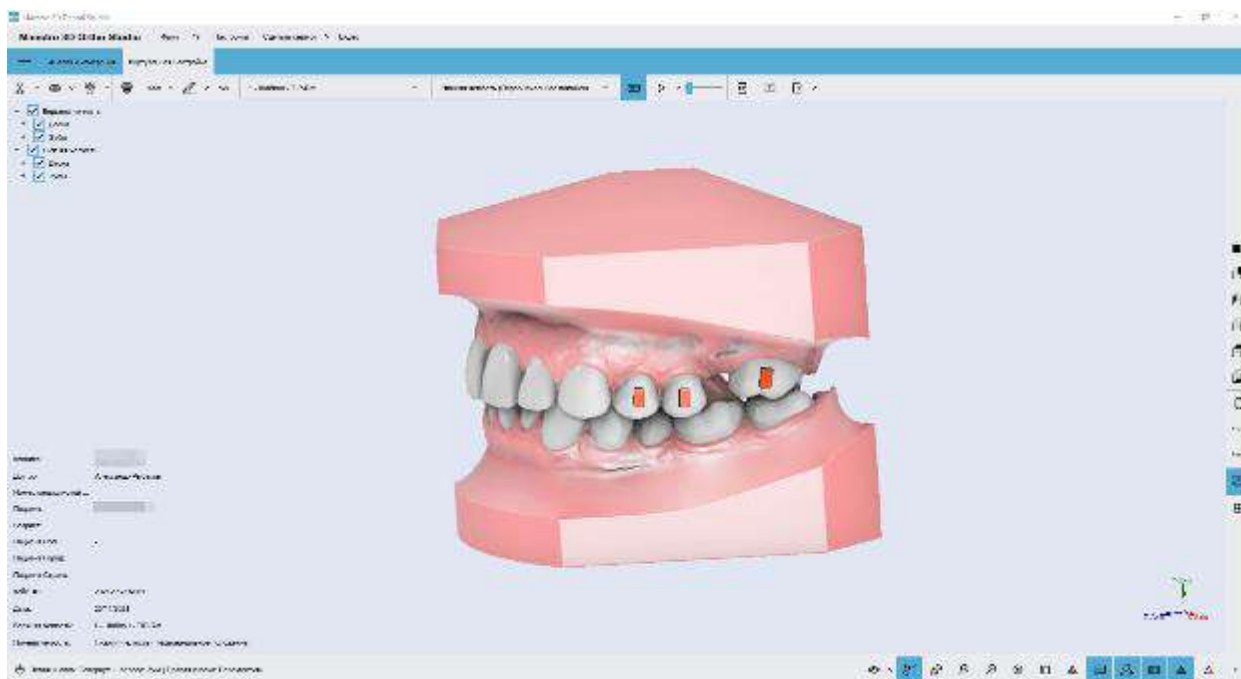


Рисунок 132 - Разработка плана лечения с использованием аттачментов,  
начальное положение

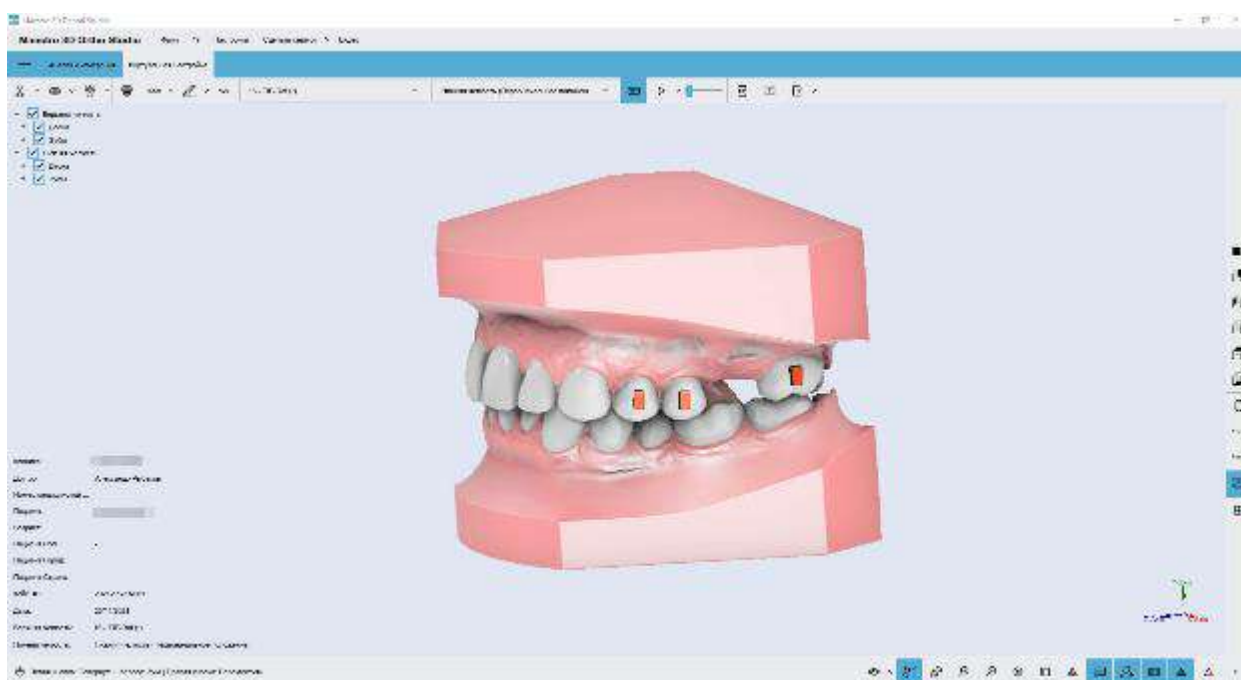


Рисунок 133 - Разработка плана лечения с использованием аттачментов, конечное положение

Планирование лечения происходило с учетом клинических целей и задач каждого пациента, все нормы ограничений и нормы перемещений каждого зуба, порядок и сочетание движений были выполнены в соответствии с физиологическими возможностями организма и физическими свойствами конструкции элайнера (рисунок 134).

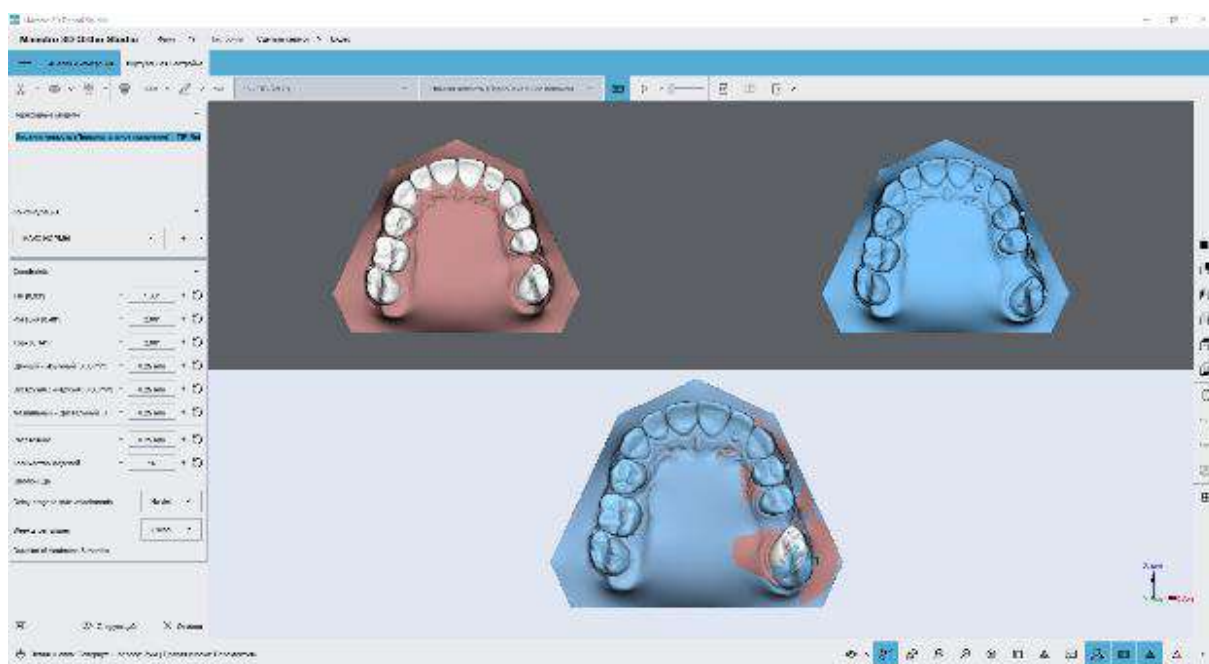


Рисунок 134 - Построение моделей с учетом ограничений перемещений зубов

В ряде клинических случаев после создания ряда моделей традиционным методом при помощи усиления балочным элементом, наряду с функциональными, были внедрены модифицированные эстетические элементы (рисунок 135, 136).

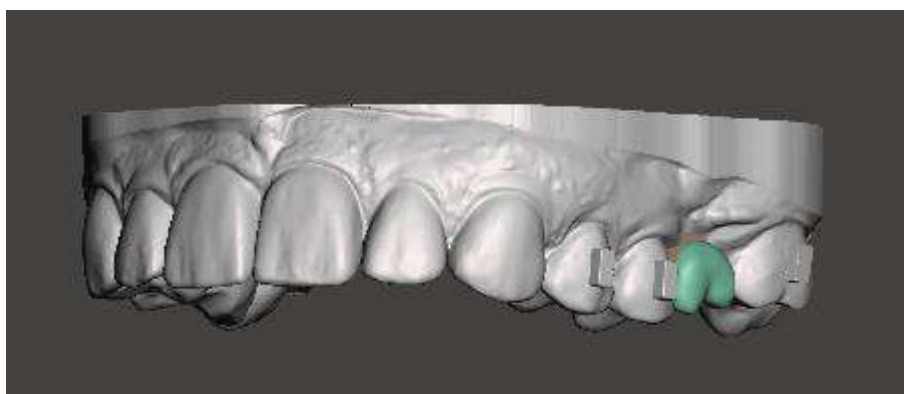


Рисунок 135 - Модификация балочного соединения добавлением частичного  
ПОНТИКА

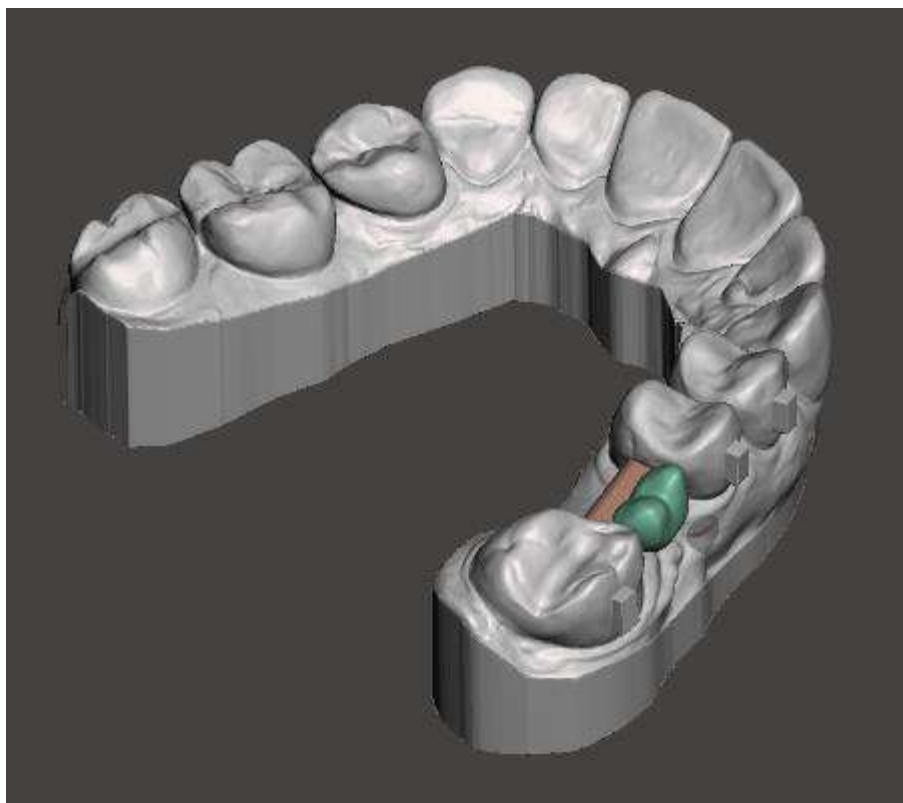


Рисунок 136 - Подбор формы и размера частичного понтика при моделировании модификации балочного соединения

Полученные модели были обработаны в программном обеспечении Photon Workshop V2 и отправлены в SLA-принтер на основе ЖК-дисплея для стереолитографической печати 3D-моделей Anycubic Photon S (рисунок 137).

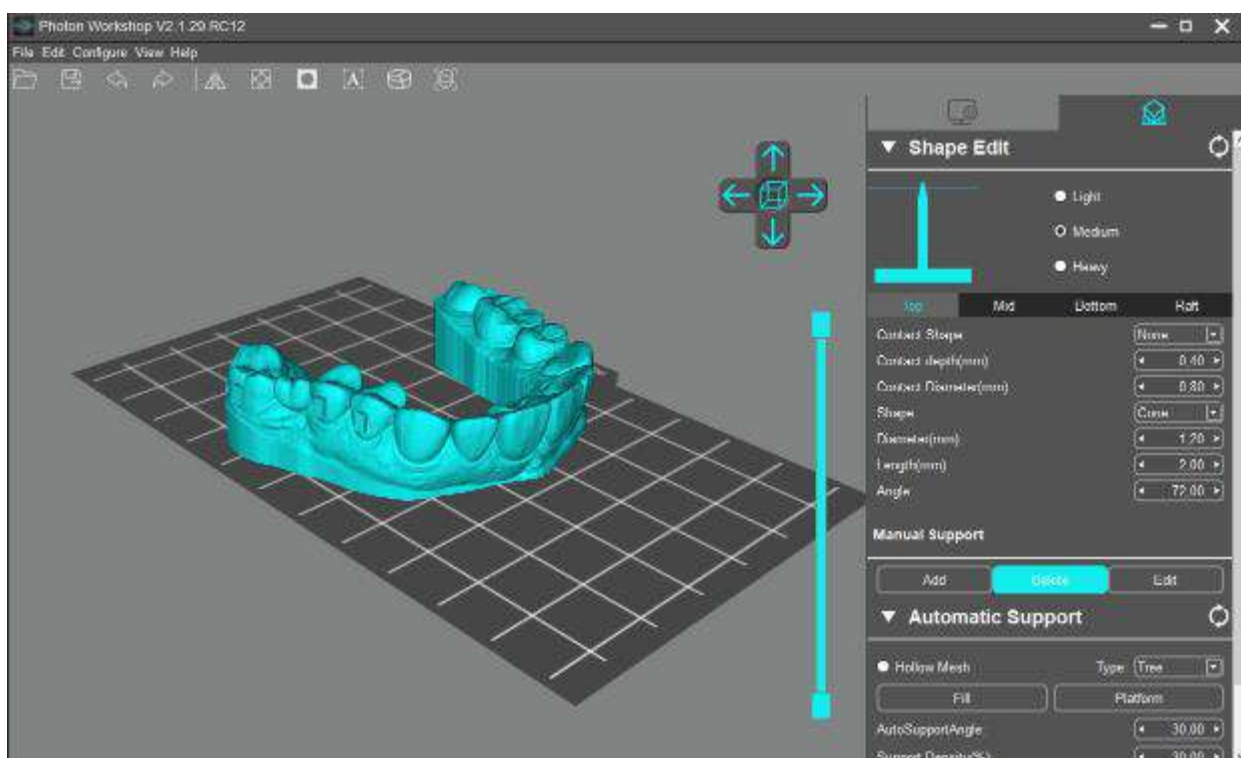


Рисунок 137 - Рабочая среда программного обеспечения Photon Workshop V2

Полученные модели были обработаны в изопропанолe и засвечены в камере с ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут (рисунок 138).

При помощи вакуумформера были изготовлены элайнеры. Далее была произведена их обрезка с учетом топологии и увеличением краев в местах с наибольшей нагрузкой (рисунок 139).





Рисунок 138 - Напечатанная трехмерная модель на 3D SLA-принтере Anycubic Photon S после обработки в изопропанолe и ультрафиолетовой засветки.



Рисунок 139 - Термоформированный и обрезанный элайнер по напечатанной модели



На начальных этапах лечения конструкции создавались с модифицированной обрезкой, были выполнены без функциональных изменений топологии и не подвергались эстетическим изменениям (рисунок 140, 141).

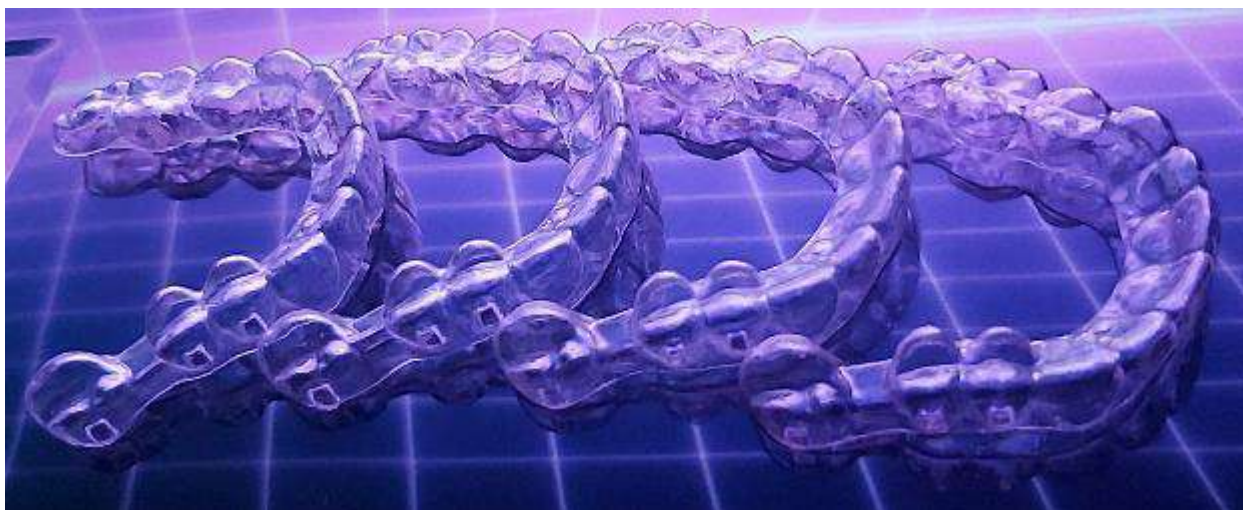


Рисунок 140 - Набор элайнеров с балочным усилением без эстетической  
КОМПОНЕНТЫ



Рисунок 141 - Шаблон элайнера со стандартным балочным усилением

Затем элайнеры с эстетическими понтиками обрабатывались при помощи нанесения бонда и тонкого слоя жидкотекучего композита. Цвет композита подбирался в соответствии с цветом зубов пациента (рисунок 142).



Рисунок 142 - Нанесение понтика при помощи жидкотекучего композитного материала

После нанесения каждого слоя производилась засветка УФ лампой 15 сек. После нанесения последнего слоя была произведена оценка просвечиваемости слоев. Окончательная засветка производилась в течение 30 секунд (рисунок 143).

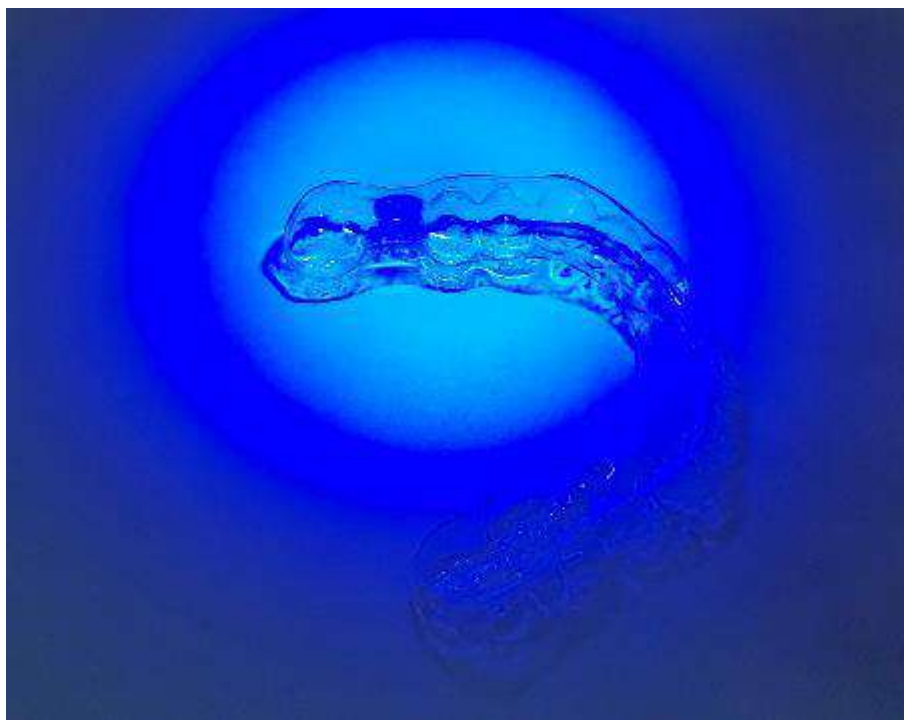


Рисунок 143 - Засветка слоев композитного материала понтика УФ лампой

Сравнение конструкций элайнеров с эстетическо-функциональной модификацией топологии и без нее (рисунок 144).



Рисунок 144 - Элайнер с балочным усилением и эстетической компонентой и без нее

На рисунках 145 - 150 приведены клинические примеры начальных этапов ортодонтического лечения с использованием элайнеров без изменений топологии, произведенных в клинике, а также по заказу в компании Flexiligner.

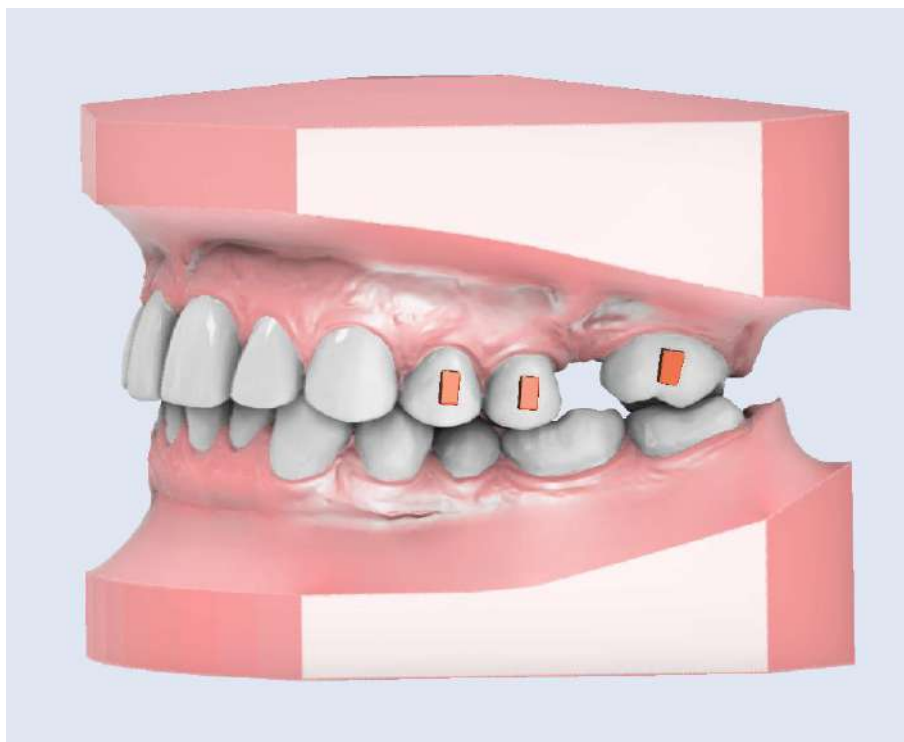


Рисунок 145 - Виртуальный план лечения шаг #1





Рисунок 146 - Элайнеры без модификации эстетической компоненты,  
выполненные автором

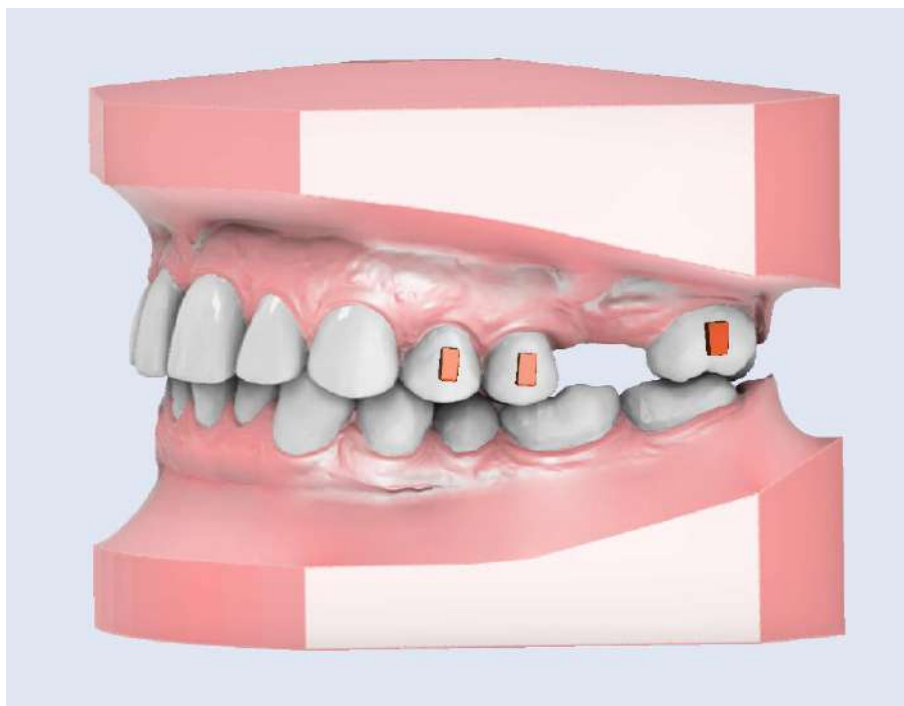


Рисунок 147 - Виртуальный план лечения шаг #16



Рисунок 148 - После окончания дистального типпинга на шаге #16



Рисунок 149 - Лечение по стандартному протоколу обрезки элайнеров (Flexiligner)

Шаг #1



Рисунок 150 - Элайнеры без эстетической компоненты, выполненные по стандартному протоколу компании Flexiligner на этапе лечения.

### **3.6.1 Протокол лечения на элайнерах**

После проведения работы с виртуальными элайнерами и выполнением расчетов элайнеров необходимой топологии, на принтере SLA были напечатаны поэтапные, в соответствии с планом лечения, модели зубных рядов. Затем путем термоформирования на напечатанных моделях были изготовлены элайнеры с

модифицированной топологией. По меткам на трехмерных моделях была выполнена обрезка элайнеров.

В результате проведенных модификаций, у пациентов не было выявлено поломок конструкций элайнеров, вызванных чрезмерной нагрузкой во время снятия и ношения элайнеров. Пример необратимой деформации элайнера (рисунок 151).



Рисунок 151 - Необратимая деформация стандартной конструкции элайнера

В результате модифицированной топологии элайнеров у пациентов не было жалоб на давление элайнеров в области отсутствующих зубов, соответственно нагрузка распределялась без опоры на СОПР. Полученный результат в местах повышенной нагрузки полностью соответствовал виртуальному плану лечения, также в области премоляров были учтены эстетические требования.

Блок-схема хода работы (рисунок 3) показывает все этапы цифрового протокола лечения на элайнерах, а блок-схема для врачей (рисунок 152) показывает готовый рекомендуемый протокол ведения пациентов на элайнерах.



Представленный в данной работе комплекс действий позволяет объединить клинические данные пациента в один массив, и сделать лечебный процесс максимально индивидуальным, автоматизировав его. Результат каждого этапа является как самостоятельным набором данных, так и основой следующего. Например, сегментированные модели из КТ являются самостоятельными цифровыми объектами для планирования хирургических и ортодонтических манипуляций. Однако для моделирования элайнеров сегментированная модель является одним из этапов работы. В свою очередь, блок-схема, представленная на рисунке 152, является оптимизированной картой для врачей-ортодонт, работающих с цифровым протоколом. Она поможет клиницисту повысить эффективность и сэкономить время при приеме пациентов, а также при работе с лабораториями, занимающимися изготовлением элайнеров.

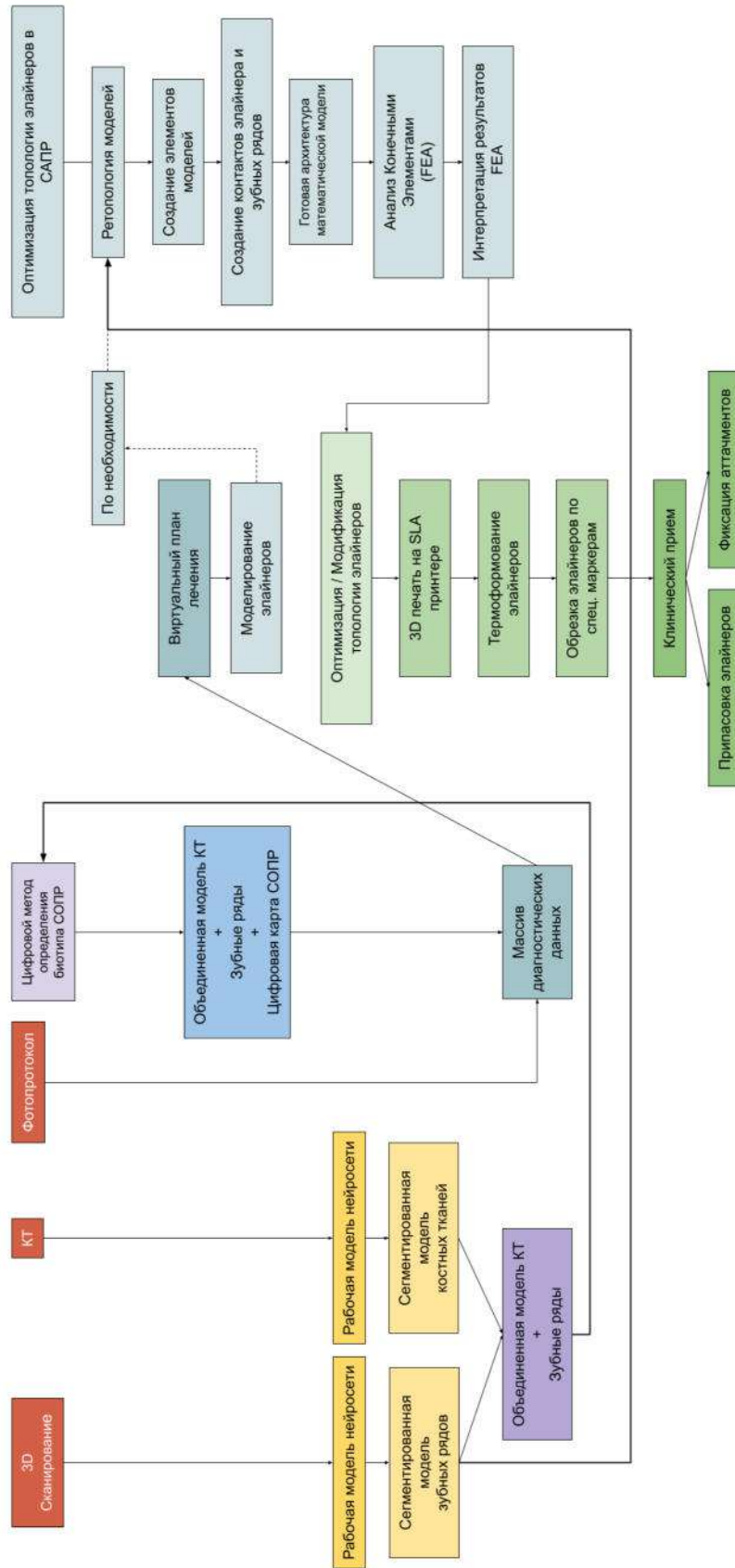


Рисунок 152 - Блок-схема работы для врачей-ортодонтонтов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аномалии прикуса у пациентов имеют весьма высокую распространенность, что говорит о необходимости поиска эффективного ортодонтического лечения, не имеющего рецидивов [5, 32].

Существуют различные методики исправления прикуса. Очевидно, что в настоящее время на первое место выходят наиболее технологичные, то есть с применением цифровых технологий, что позволяет сделать их полностью предсказуемыми. На данное время таковой методикой является лечение на элайнерах [104, 170, 192].

Появление в 1997 году элайнеров оказало в последствии большое влияние на развитие ортодонтии. Эти аппараты учитывают индивидуальную анатомию зубов и могут выполнять перемещение зубов с оптимальными силами, безопасными для пародонта. Движения зубов более физиологичны, а полученный лечебный эффект более индивидуален и соответствует форме зубных дуг и окружающих их мягких тканей.

При использовании современных цифровых технологий и их комбинаций, [85, 180, 304] появляется возможность проведения детального анализа и прогнозирования рисков осложнений. В случае неправильного выбора топологии элайнера на перемещаемый зуб могут быть приложены чрезмерные силы либо оказано избыточное давление на десну, что может привести к рецессии, особенно если это десна с тонким биотипом. Отсюда следует, для того чтобы избежать осложнений в виде рецессии десны, крайне необходим точный и простой метод определения биотипа слизистой оболочки полости рта [232].

Используемые в настоящий момент протоколы с применением элайнеров мало изучены и не учитывают влияния биотипа слизистой полости рта на конечный результат.

**Цель исследования:** повышение эффективности комплексного лечения ортодонтических пациентов на элайнерах.

Одним из важных направлений современной стоматологии является определение биотипа СОПР. Это важно для разработки эффективного плана лечения и сведения к минимуму потенциальных осложнений, таких как рецессия десны.

В клинической практике особое внимание уделяется тонкому биотипу десны, так как при ортодонтическом лечении у пациентов с толстым биотипом слизистой может развиваться локальная форма пародонтита, а в случае с тонким биотипом, вероятность развития рецессий намного выше, поскольку потеря зубодесневого прикрепления ведет к маргинальному воспалению и резорбции стенки альвеолы. Перед началом ортодонтического лечения необходимо удостовериться в начальном статусе ортодонтического пациента и его готовности к лечению. В большинстве случаев, если гигиена неудовлетворительна, пациента следует обучить гигиене полости рта и назначить следующий визит для проверки индексов гигиены. При плохой гигиене полости рта во время ортодонтического лечения будут возникать осложнения, связанные с воспалительными процессами СОПР. При наличии воспаления СОПР до начала ортодонтического лечения неизбежно возникнут ошибки определения биотипа СОПР и, следовательно, выбора тактики лечения.

Использование сверточной нейронной сети (CNN) в ортодонтической практике выводит процесс лечения на более высокий уровень. Тем самым создаются исключительные возможности для индивидуализации топологии элайнеров.

Последние исследования показывают, что при использовании сверточных нейронных сетей в случае компьютерного цефалометрического анализа результаты

лучше, чем при их выполнении рентгенологом или ортодонтом вручную [119, 184, 236].

Нейронные сети могут провести анализ КЛКТ и определить патологии кости верхней и нижней челюсти, уровень кости или местоположение ретинированных зубов.

Сверточные нейронные сети используются для решения различных задач, связанных с сегментацией зубов и анализом цифровых моделей.

Цифровые модели зубов, полученные интраоральным сканером, являются единым объектом, подобно гипсовой модели. Поэтому каждый зуб необходимо разделить (сегментировать) программно.

Полностью автоматизированное программное обеспечение автоматически сегментирует и выравнивает зубы по данным интраорального сканирования.

Сегментация зуба является важным шагом для реконструкции 3D модели зуба. Были достигнуты успехи в алгоритмах автоматической сегментации с использованием машинного обучения и глубокого обучения. Результаты проведенных исследований указывают на значительное превосходство методов глубокого обучения в ортодонтии над другими высокопроизводительными алгоритмами.

Сегментирование при помощи ИИ (искусственного интеллекта) или НС (нейронных сетей) в дальнейшем используется для работы с пациентами при составлении цифрового плана лечения и прецизионного контроля положения корней зубов.

На первом этапе хода работы для данного исследования было проведено сканирование полости рта пациентов при помощи интраорального сканера Planmeca Emerald™ (Planmeca, Хельсинки, Финляндия) и созданы трехмерные

модели зубных рядов. Проведена обработка и ручная сегментация полученных моделей с разделением на отдельные модели каждого зуба и мягких тканей.

На втором этапе хода работы получены данные КТ пациентов, выполнена ручная сегментация КТ, и применен ИИ в сегментации КТ. В данной работе представлены следующие варианты сегментации костных структур лицевого скелета и отдельных зубов:

- 1) Ручная сегментация
- 2) Ручная островная сегментация
- 3) Алгоритм сегментации по водоразделам (WaterShed)
- 4) Автоматическая при помощи ИИ (НС)

Для ручного метода первым этапом является обработка КЛКТ и сегментация костных структур по шкале Хаунсфилда для создания трехмерной модели без использования фильтров и модификаций изображений. Каждый набор данных в формате dicom был обработан в программном обеспечении Mimics inPrint 2.0 и Mimics PRO Plan CMF 3.0.

При наличии обученной модели, сегментация происходит в автоматическом режиме и занимает несколько секунд. В случае отсутствия такой модели, обучение занимает продолжительное время, однако оно намного меньше, чем при работе ручным методом.

В исследовании использовались данные, которые были получены с помощью аппарата КЛКТ и обработаны в программном обеспечении Dragonfly (v.2022.2, Objects Research Systems, Монреаль, QC, Канада). Значения HU данных КЛКТ были нормализованы для стандартизации обучения нейросети.

Для уменьшения объема вычисляемых данных требовалось выполнить предварительную обработку. После нормализации данных была выполнена семантическая сегментация КЛКТ. Далее было произведено увеличение данных. Это так называемый метод искусственного создания большего количества

обучающих выборок для увеличения разнообразия обучающих данных. Было выполнено ручное сегментирование при обучении U-Net, и в результате была получена семантическая сегментация изображений с помощью U-Net.

В данном исследовании эффективность сегментации изображений была значительно повышена при помощи обучения сети путем ручной маркировки пяти изображений. Впоследствии за счет расширения объема данных может быть выполнена полностью автоматическая сегментация и идентификация множества тканей в полости рта. Повышение точности автоматической сегментации позволит значительно улучшить автоматизированную диагностику в стоматологии.

На третьем этапе хода работы после обработки данных КТ сегментирования костных структур и сегментирования зубов и слизистой полости рта на трехмерных моделях зубных рядов было проведено наложение и сопоставление всех данных в единое целое. Это позволило получить слои костной ткани, оболочку мягких тканей полости рта и референтных зубов отдельно. Определение дистанций от поверхности модели СОПР до костных структур и комбинированных моделей зубов определили совокупность цветовой карты толщины СОПР, а распределение по зонам и графические данные позволили провести анализ по определению биотипа СОПР.

Проведенные исследования показали, что дисперсионный анализ распределения зон выявил три типа слизистой полости рта – тонкий, толстый и смешанный, что соответствует традиционным исследованиям при помощи пародонтологического зонда. Результатом работы явилось создание корреляционной модели цифровой карты СОПР. Предложен новый метод для получения цифровой карты биотипа СОПР.

На четвертом этапе хода работы проводилась разработка планов ортодонтического лечения пациентов в программном обеспечении Maestro Ortho Studio V5. Планирование лечения происходило с учетом клинических целей и задач

для каждого пациента. Все нормы по ограничениям и нормы по перемещениям каждого зуба, порядок и сочетание движений зубов были выполнены в соответствии с физиологическими возможностями организма и физическими свойствами конструкций элайнеров.

Так как основные принципы биомеханики опираются на усредненные значения, следовательно не учитываются индивидуальные особенности каждого конкретного пациента. В том случае, когда индивидуализация ортодонтического лечения пациента отсутствует, часть физических свойств элайнеров теряется [96]. Была поставлена цель: получить визуальное отображения деформаций и напряжений в элайнере при помощи расчетов в физико-математических программных пакетах и результаты использовать для оптимизации данной ортодонтической конструкции.

На пятом этапе хода работы при моделировании виртуальной модели элайнера были взяты физические свойства PET-G материала и внесены в рабочую среду программного обеспечения ANSYS (ANSYS V.18; ANSYS Inc., Канонсбург, США).

Так как ни один из приведенных ранее в литературе методов моделирования нагрузки не подходил для данной задачи, была разработана новая методика посадки элайнера на зубные ряды. В новой методике движения как элайнера, так и зубного ряда были подобраны таким образом, чтобы края конструкции элайнера не деформировалась от контакта с моделью зубных рядов, и модель создавала реальную траекторию посадки элайнера на зубные ряды.

Для создания моделей анализа топологии элайнера с эстетической компонентой были разработаны и проанализированы различные виды балочных соединений, подходящих под модификацию с эстетической компонентой. Дизайн исследования элайнера с определенными физическими параметрами и базовой



моделью зубных рядов был взят из ранее разработанного и модифицировался под необходимую задачу для каждого клинического случая отдельно.

Для исследуемого контрольного набора элайнеров с целью получения усиления и увеличения эластичности конструкции был выбран стандартный тип балочного соединения и проведен его анализ на предмет деформаций и напряжения в конструкции.

Ортодонтические конструкции с эстетическими компонентами, полученные в результате моделирования, были обработаны в программе ANSYS mechanical для дальнейшего анализа.

В сравнительный набор элайнеров были включены стандартные клинические решения с учетом эстетики, для чего был создан понтик в области, где непосредственно отсутствовал зуб.

Математический анализ конечными элементами показал слабые стороны конструкций типа «балка» и «понтик», а также возможные пути их модификации.

Исходя из анализа обеих конструкций было решено провести их модификацию. То есть получить новую конструкцию, которая включала бы как эстетическую, так и функциональную составляющую. Такое решение позволило снять нагрузку с десны в области утраченного зуба и не нарушить силовую конструкцию элайнера, помимо этого, улучшить эстетическую составляющую конструкции, что, как правило, приводит к повышению мотивации пациента в процессе лечения.

Согласно результатам расчётов конечными элементами, топология элайнера сильно влияет на его сопротивление деформациям. Непредвиденные деформации в элайнере перенаправляют силы с боковых поверхностей конструкции на окклюзионную поверхность, что в свою очередь влияет на предсказуемость лечения, и может привести к отклонению от начального виртуального плана, а

также к необходимости дополнительных коррекций во время клинического приема.

Исходя из визуального анализа полученных данных, можно сделать вывод о зонах наибольшей напряженности конструкции, ее физических свойствах и давлении (приложенных силах) на каждый зуб и всю дугу в целом. Визуализация напряжений в конструкции элайнера помогает определить оптимальную форму обрезки в определенных местах, индивидуальных для каждого клинического случая, а также увеличить прочность конструкции, ее устойчивость к износу, появлению микротрещин и поломок.

Элайнеры с прямой обрезкой на каждом этапе показали лучшую стабильность и предсказуемость по отношению к прогнозируемым результатам. При обрезке по десневому краю конструкция сильно деформируется при начальной активации и плохо распределяет давление на зубы, что приводит к отклонению от запланированных в виртуальном сетапе шагов.

На шестом этапе хода работы полученные модели зубных рядов были обработаны в программном обеспечении Photon Workshop V2 и затем отправлены в SLA-принтер на основе ЖК-дисплея для стереолитографической печати 3D-моделей Anycubic Photon S.

Напечатанные на 3D принтере модели были обработаны в изопропанолe и засвечены в камере с ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут.

При помощи вакуумформера были изготовлены элайнеры. Далее была произведена их обрезка с учетом топологии и увеличением краев в местах с наибольшей нагрузкой.

На начальных этапах лечения ортодонтические конструкции создавались с модифицированной обрезкой и были выполнены без функциональных изменений топологии, и не подвергались эстетическим изменениям.

Затем элайнеры с эстетическими понтиками обрабатывались при помощи нанесения бонда и тонкого слоя жидкотекучего композита. Цвет композита подбирался в соответствии с цветом зубов пациента.

Клинические примеры начальных этапов лечения без изменений топологии элайнеров выполнялись при помощи производства элайнеров в клинике, а также заказов в компании Flexiligner.

Помимо высокой требовательности, предъявляемой к эстетике элайнеров, конструкции элайнеров должны также выполнять свою прямую функцию. В исследованиях конечными элементами было подтверждено, что в элайнерах присутствует дополнительная нагрузка на верхней и средней трети резцов на вестибулярной поверхности [84, 200, 324].

Данный эффект был подтверждён при проведении исследования, однако избежать его полностью не удалось. Возможность уменьшения эффекта осуществляется путем добавления ребер жесткости с вестибулярной стороны и увеличением высоты элайнера в переднем отделе с небной и вестибулярной стороны. При проведении лечения на элайнерах с удалением или при первичной и вторичной адентии, к элайнеру помимо эстетических свойств предъявляются и повышенные физические требования. Поэтому в ходе работы были разработаны комбинированные конструкции понтиков. С щечной или вестибулярной стороны располагался понтик, а с язычной или небной стороны – балочное усиление конструкции. По данным расчетов FEA такой тип моделирования эстетического понтика распределяет нагрузки как при использовании только балочного соединения, но с эстетикой понтика. Это дает минимальную возможность осложнений и лучший контроль перемещения зубов.

Для нового протокола ортодонтического лечения предложен метод получения индивидуальной карты биотипа СОПР с целью индивидуализации объема обрезки элайнеров с наименьшими изменениями их физических свойств и

обеспечению индивидуального подхода для достижения наилучшего планируемого результата. Карта биотипа СОПР станет весьма полезна и в стоматологической хирургии, она существенно облегчит работу врачей хирургов при установке ортодонтических мини-имплантов. Цифровая карта биотипа СОПР сокращает время клинического приема и не требует дополнительных процедур, в том числе инвазивных, для получения необходимой информации о толщине слизистой полости рта в проблемных точках. Карта биотипа дает не только возможность выбора общей обрезки элайнеров для обеих челюсти, но и индивидуализацию для каждой челюсти отдельно.

Предложенные новые протоколы существенно уменьшают вероятность возникновения осложнений ортодонтического лечения по причине некомплаентности пациента и нарушения протоколов ношения элайнеров и эластиков.

Предложено решение еще одной проблемы, которая может возникнуть при лечении на элайнерах, а именно нефизиологического давления на слизистую полости рта пациента. При использовании съемных аппаратов (обычно речь идет о частичных съемных пластиночных протезах) происходит распределение жевательной нагрузки через базис протеза на слизистую оболочку и костную ткань, что является их большим недостатком. Так как слизистая полости рта не обладает морфологическими структурами, которые могут амортизировать давление, происходит сдавливание слизистой, что в свою очередь приводит к нарушению кровообращения в этих местах. Аналогичная ситуация возникает и при длительном использовании элайнеров, когда на место утраченного зуба приходится опора элайнера [3, 12, 14, 15]. Применяя анализ конечными элементами, наглядно видны места избыточного давления на СОПР при активации элайнера. Это дает возможность, изменив топологию элайнера или конструктивно усилив отдельные части элайнера, уменьшить или убрать давление на слизистую при деформациях элайнера, что и было доказано в работе, проведенной автором. Разработан новый

протокол модификации топологии элайнера при помощи анализа конечными элементами.

Визуализация данных о напряжении, возникшем в конструкции элайнера при активации, дают полный контроль над нагрузкой на зубы, распределением ортодонтических сил и направлением их на каждый зуб, участвующий в движении и анкорраже.

Однако массовое использование метода конечных элементов как обязательного протокола в ортодонтическом лечении непосредственно клиницистами является вопросом времени, так как упирается в проблему увеличения вычислительных мощностей. На сегодняшний день метод конечных элементов используется большинством компаний производителей элайнеров, однако данные являются закрытыми и никак не влияют на протоколы ведения ортодонтического пациента, а только помогают выбрать толщину и жесткость материала, из которого изготавливают элайнеры.

Все поставленные в работе цели и задачи были успешно выполнены. В работе предложен новый обязательный протокол ортодонтического лечения с применением автоматической сегментации при помощи ИИ для осуществления контроля положения корней зубов и обеспечения лучшего прогнозирования хода лечения. Это обеспечивает наиболее безопасный подход (дегисценция и фенестрация) в плане предупреждения осложнений. Данный протокол также создаёт возможность выбора формы аттачментов и их положения для успешного достижения запланированного результата ортодонтического лечения.

## ВЫВОДЫ

1. Используя полученные интраоральным сканером трёхмерные модели зубных рядов, были составлены виртуальные планы лечения ортодонтических пациентов на элайнерах.
2. Получены данные КТ ортодонтических пациентов, проведена сегментация данных методами ручной сегментации, методом сегментации по водоразделам, островная и с использованием обученной нейронной сети U-Net, проведен сравнительный анализ и выбрана наиболее технологичная методика сегментации при помощи ИИ с большими возможностями дальнейшего применения.
3. Разработан алгоритм получения цифровой карты биотипа СОПР путем совмещения полученных цифровых данных трехмерных моделей интраоральным сканером и сегментированных моделей костных структур из КТ при помощи ИИ. Подтверждено отсутствие воспалительных процессов в СОПР ортодонтических пациентов при помощи индекса РМА с использованием «Колор-Тест №1». Проведен сравнительный анализ определения биотипа СОПР традиционным методом с разработанными цифровыми картами.
4. Разработан новый оригинальный дизайн математических моделей ортодонтических элайнеров, отличный от дизайна, используемого другими исследователями и не описанный ранее в литературе. Общий разработанный алгоритм дизайна подвергался модификациям для каждого клинического случая отдельно. Эффективность определялась степенью деформаций и распределением нагрузки на всю конструкцию элайнера.
5. Проведен сравнительный анализ существующих стандартных методик изготовления ортодонтических элайнеров, учитывающих дополнительное уменьшение краев обрезки при изменениях пародонта. При помощи системы автоматизированного проектирования были получены расчеты деформаций элайнеров, и представлены карты распределения нагрузок и деформаций. Такая

визуализация наглядно показала области в конструкции элайнеров, нуждающиеся в усилении.

Опираясь на полученные результаты математического анализа, обоснованы методики применения фестончатой и прямой обрезки элайнеров в зависимости от биотипа десны. При тонком биотипе десны используется фестончатая обрезка применяемых элайнеров. Элайнеры требуется усиливать высокой обрезкой в местах активного перемещения отдельных зубов (тракция, мезио-дистальные перемещения, ротации).

По результатам математического анализа конечными элементами ортодонтических конструкций с комбинированными эстетическими компонентами доказано, что полученная конструкция обладает улучшенными физическими и эстетическими свойствами.

6. Разработан цифровой протокол ортодонтического лечения на элайнерах по выбранным критериям. На основе обученной модели нейронных сетей, анализа методом конечных элементов и цифровых карт слизистой полости рта предложен новый протокол ортодонтического лечения, применение которого приводит к дальнейшей индивидуализации и оптимизации ортодонтического лечения. Протокол позволяет повысить качество, сэкономить время и увеличить комплаентность пациентов в процессе лечения.

## КЛИНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Для того чтобы ортодонтическое лечение было прогнозируемым и эффективным, необходимо использовать совмещение сегментированных данных КТ с цифровыми моделями зубных рядов. Необходимо использовать компьютерные программы для планирования ортодонтического лечения.

Обязательно использовать карту биотипа СОПР пациента при ортодонтическом лечении для минимизации риска осложнений.

В сложных клинических случаях лечения ортодонтического пациента, необходимо проводить анализ ортодонтической конструкции конечными элементами по представленной в данной работе модели, и выполнять модификацию топологии элайнеров при наличии избыточных деформаций.

Для уменьшения рисков осложнений, следует использовать индивидуальную обрезку элайнеров для каждого пациента, опираясь на результаты анализа конечными элементами.

При возникновении необходимости использования понтиков во время лечения на элайнерах, обязательно следует проводить их усиление балочными элементами и создавать комбинированную конструкцию, что позволит минимизировать осложнения при неправильном распределении сил в элайнере и позволит избавиться от нагрузки на СОПР.

Современное ортодонтическое лечение с применением элайнеров предполагает выполнение последовательно ряда высокотехнологичных операций:

- сбор цифровых данных;
- сегментация КТ;
- сегментация отсканированных моделей зубных рядов;
- получение цифровой карты толщины СОПР;



- анализ топологии элайнеров конечными элементами;
- модификация топологии элайнеров.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИИ: Искусственный интеллект

КЛКТ: Конусно-лучевая компьютерная томография

КТ: Компьютерная томография

ПО: Программное обеспечение

САПР: Системы автоматизированного проектирования

СОПР: Слизистая оболочка полости рта

ТПЭ: Терапия прозрачных элайнеров

CNN: Convolutional neural network (Сверточная нейронная сеть)

DL: Deep learning (Глубокое обучение)

FCN: Fully convolutional network (Полностью сверточная нейронная сеть)

FEA: Finite element analysis (Анализ конечными элементами)

GAN: Generative adversarial network (Генеративно-сопоставительные сети)

MSE: Mean Squared Error (Средняя квадратичная ошибка)

PET-G: Polyethylene terephthalate glycol (Полиэтилентерефталат-гликоль)

RFCN: Region-based fully convolutional network (Сверточная нейронная сеть)

RNN: Recurrent neural network (Рекуррентная нейронная сеть)

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Арсенина, О. И. Ортодонтическое лечение пациентки с тонким биотипом десны и аномалиями окклюзии / О. И. Арсенина, А. И. Грудянов, А. Г. Надточий [и др.] // Стоматология. – 2020. – Т. 99. – № 1. – С. 89-94.
2. Арсенина, О. И. Диагностика и лечение воспалительных процессов в пародонте, возникших при ортодонтическом лечении / О. И. Арсенина, О. А. Фролова, О. В. Петрунина // Институт стоматологии. – 2005. – Т. 1. – № 26. – С. 50-55.
3. Багрянцева, Н. В. Совершенствование методов временного протезирования пациентов с частичной и полной потерей зубов на этапах дентальной имплантации: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.14 / Н. В. Багрянцева. – Нижний Новгород, 2020. – 225 с.
4. Волкова, М. Н. Заболевания слизистой оболочки рта / М. Н. Волкова, Ю. П. Чернявский, Н. А. Сахарук, Е. Р. Еленская. – Витебск, 2016. – 236 с.
5. Воробьев, М. В. Частота встречаемости зубочелюстных аномалий у детей и факторы, влияющие на их возникновение / М. В. Воробьев, Ш. Ф. Джураева, М. В. Мосеева, А. А. Тропина // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2022. – № 6 2022. – С. 7-11.
6. Гончарик, И. Н. Непрямой метод фиксации брекет-системы с использованием нового отечественного адгезива / И. Н. Гончарик, Н. А. Соколов, А. В. Рыбаков [и др.] // Институт Стоматологии. – 2023. – Т. 4 (101). – С. 52-54.
7. Денисова, Е. Г. Биотипы пародонта и рецессия десны: гигиенические аспекты / Е. Г. Денисова, И. И. Соколова. – 2015. – Т. 4. – № 69. – С. 143-147.
8. Иорданишвили, А. К. Гигиена полости рта, состояние тканей пародонта и пути их улучшения у молодых людей, проходящих ортодонтическое лечение / А. К. Иорданишвили, К. А. Керимханов, Л. Н. Солдатова, В. Ф. Черныш. – 2015.

9. Иорданишвили, А. К. Заболевания органов и тканей полости рта у лиц молодого возраста / А. К. Иорданишвили, А. С. Солдаткина // Институт стоматологии. – 2015. – № 3. – С. 38-41.

10. Карнеева Т.В. Рецессия десны и ее основные причины / Карнеева Т.В. // Здоровоохранение Дальнего Востока. – 2019. – № 4. – С. 54-56.

11. Колесник, К. А. Клиническая оценка состояния тканей пародонта у подростков с экзогенно-конституционным ожирением / К. А. Колесник, Г. В. Жердева // Институт стоматологии. – 2015. – № 2. – С. 74-75.

12. Комлев, С. С. Новые технологии в комплексном лечении пациентов при частичном и полном отсутствии зубов: дис. ... д-ра. мед. наук: 14.01.14 / С. С. Комлев. – 2020. – 297 с.

13. Копецкий, И. С. Биотип пародонта: анатомические особенности и взаимосвязь с окружающими тканями / И. С. Копецкий, Л. В. Побожьева, Ю. В. Шевелюк, А. И. Копецкая. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 114-119.

14. Коротких, Н. Г. Основы реабилитации стоматологических больных хирургической практики методом дентальной имплантации / Н. Г. Коротких, Н. Е. Митин, Л. П. Набатчикова, Л. Б. Филимонова. – Методические рекомендации для студентов стоматологического факультета, интернов, клинических ординаторов, 2013. – 33 с.

15. Порошин, А. В. Ортопедическое лечение полными съемными протезами с фиксацией на мини-имплантаты / А. В. Порошин, Д. В. Михальченко, А. А. Алешечкин, А. Ю. Майборода // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2013. – № 4. – С. 50-51.

16. Рыбаков, А. В. Двухэтапная Методика Исследования Положения Мышечков Височно-Нижнечелюстного Сустава : тез. докл. межвузовской

конференции РУДН «Актуальные вопросы стоматологии» / А. В. Рыбаков, Н. А. Соколович. – Москва, 2022. – 114-115 с.

17. Саркисян, В. М. Варианты строения десны при разных биотипах / В. М. Саркисян, О. В. Зайратьянц, А. М. Панин, М. Г. Панин // Dental Forum. - 2011. - No. 5. – 2011. – С. 105-106.

18. Саркисян, В. М. Морфологические особенности десны разных биотипов / В. М. Саркисян, О. В. Зайратьянц, А. М. Панин, М. Г. Панин // Пародонтология. – 2012. – Т. 1. – № 62. – С. 26-29.

19. Смирнова, С. С. Модификация клинического метода измерения толщины десны и экспериментальное обоснование его эффективности / С. С. Смирнова, Г. И. Ронь, И. Е. Валамина [и др.] // Вестник уральской Медицинской академической науки. – 2010. – № 2. – С. 100-102.

20. Соколович, Н. А. Методика оценки положения височно-нижнечелюстного сустава / Н. А. Соколович, А. В. Рыбаков, А. А. Саунина [и др.] // Медицинский Альянс. – 2023. – Т. 11. – № 1.

21. Тарасенко, С. В. Индексная оценка состояния пародонта у больных ревматоидным артритом / С. В. Тарасенко, А. А. Макаревич // Российский стоматологический журнал. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 199-202.

22. Улитовский, С. Б. Изучение распространенности заболеваний пародонта у ортодонтических пациентов / С. Б. Улитовский, А. В. Шевцов // Пародонтология. – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 37-41.

23. Цур, О. Пластическая и эстетическая хирургия / О. Цур, М. Хюрцелер. – 2014. – 847 с.

24. Шашурина, С. В. Совершенствование методов хирургического лечения рецессий десны: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.14 / С. В. Шашурина. – Тверь : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Нижегородская государственная медицинская академия» министерства здравоохранения Российской Федерации», 2017. – 281 с.

25. Щербаков, А. С. Рецессии десны: этиопатогенез, особенности планирования лечения и профилактики / А. С. Щербаков, М. Б. Кузнецова, С. И. Виноградова [и др.] // Верхневолжский медицинский журнал. – 2012. – Т. 10. – № 1. – С. 6.

26. Abdallah, M. N. Biomaterials used in orthodontics: Brackets, archwires, and clear aligners / M. N. Abdallah, T. Lou, J. M. Retrouvey, S. Suri // *Advanced Dental Biomaterials*. – 2019.

27. Abraham, S. Gingival biotype and its clinical significance - A review / S. Abraham, K. T. Deepak, R. Ambili [et al.] // *Saudi Journal for Dental Research*. – 2014. – Vol. 5. – № 1. – P. 3-7.

28. Ahn, H. W. Effects of aging procedures on the molecular, biochemical, morphological, and mechanical properties of vacuum-formed retainers / H. W. Ahn, H. R. Ha, H. N. Lim, S. Choi // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2015. – Vol. 51.

29. Ahn, H. W. A new type of clear orthodontic retainer incorporating multi-layer hybrid materials / H. W. Ahn, K. A. Kim, S. H. Kim // *Korean Journal of Orthodontics*. – 2015. – Vol. 45. – № 5.

30. Akhoondali, H. Rapid automatic segmentation and visualization of teeth in CT-scan data / H. Akhoondali, R. A. Zoroofi, G. Shirani // *Journal of Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 9. – № 11.

31. Alexandropoulos, A. Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials / A. Alexandropoulos, Y. S. Al Jabbari, S. Zinelis, T. Eliades // *Australian orthodontic journal*. – 2015. – Vol. 31. – № 2.

32. Alhammadi, M. S. Global distribution of malocclusion traits: A systematic review / M. S. Alhammadi, E. Halboub, M. S. Fayed [et al.] // *Dental Press Journal of Orthodontics*. – 2018. – Vol. 23. – № 6. – P. 40.e1.
33. Al-Nadawi, M. Effect of clear aligner wear protocol on the efficacy of tooth movement: A randomized clinical trial / M. Al-Nadawi, N. D. Kravitz, I. Hansa [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2021. – Vol. 91. – № 2.
34. Alom, M. Z. Inception recurrent convolutional neural network for object recognition / M. Z. Alom, M. Hasan, C. Yakopcic [et al.] // *Machine Vision and Applications*. – 2021. – Vol. 32. – № 1.
35. Alves, P. H. M. Measurement properties of gingival biotype evaluation methods / P. H. M. Alves, T. C. L. P. Alves, T. A. Pegoraro [et al.] // *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. – 2018. – Vol. 20. – № 3. – P. 280-284.
36. Al-Zahrani, M. S. Comparison of Cone Beam Computed Tomography-Derived Alveolar Bone Density Between Subjects with and without Aggressive Periodontitis / M. S. Al-Zahrani // *Journal of clinical and diagnostic research*. – 2017.
37. Amorim, P. H. J. Reconstruction of Panoramic Dental Images Through Bézier Function Optimization / P. H. J. Amorim, T. F. Moraes, J. V. L. Silva [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2020. – Vol. 8.
38. Anand, P. S. Width and thickness of the gingiva in periodontally healthy individuals in a central Indian population: a cross-sectional study / P. S. Anand, A. Bansal, B. R. Shenoi [et al.] // *Clinical Oral Investigations*. – 2022. – Vol. 26. – № 1. – P. 751-759.
39. Andrews, L. The concept and appliance / L. Andrews // *the concept and appliance*. – 1989.

40. Arita, M. Consideration of the AM method in PMA index / M. Arita, S. Yamada, H. Tanoi [et al.] // *Koku Eisei Gakkai zasshi*. – 1972. – Vol. 22. – № 2. – P. 264-268.
41. Avendi, M. R. A combined deep-learning and deformable-model approach to fully automatic segmentation of the left ventricle in cardiac MRI / M. R. Avendi, A. Kheradvar, H. Jafarkhani // *Medical Image Analysis*. – 2016. – Vol. 30.
42. Ayidaga, C. Effects of Variable Composite Attachment Shapes in Controlling Upper Molar Distalization with Aligners: A Nonlinear Finite Element Study / C. Ayidaga, B. Kamiloglu // *Journal of Healthcare Engineering*. – 2021. – Vol. 2021.
43. Badrinarayanan, V. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation / V. Badrinarayanan, A. Kendall, R. Cipolla // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2017. – Vol. 39. – № 12.
44. Bai, Y. X. Patients with anterior spaces caused by periodontal disease treated with aligner technique / Y. X. Bai, B. Yang, Q. Dai [et al.] // *Zhonghua kou qiang yi xue za zhi = Zhonghua kouqiang yixue zazhi = Chinese journal of stomatology*. – 2009. – Vol. 44. – № 7.
45. Bargellini, A. Short Term Evaluation of the Effects of Orthodontic Clear Aligners on Sleep Bruxism Activity / A. Bargellini, T. Castroflorio, F. Casasco [et al.] // *Iranian Journal of Orthodontics*. – 2016. – Vol. 12. – № 2.
46. Barone, S. CT segmentation of dental shapes by anatomy-driven reformation imaging and B-spline modelling / S. Barone, A. Paoli, A. V. Rationale // *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. – 2016. – Vol. 32. – № 6.
47. Barreto, M. S. Reliability of digital orthodontic setups / M. S. Barreto, J. Faber, C. J. Vogel, T. M. Araujo // *The Angle Orthodontist*. – 2016. – Vol. 86. – № 2. – P. 255-259.



48. Barriviera, M. A new method to assess and measure palatal masticatory mucosa by cone-beam computerized tomography / M. Barriviera, W. R. Duarte, A. L. Januário [et al.] // *Journal of Clinical Periodontology*. – 2009. – Vol. 36. – № 7. – P. 564-568.

49. Baumgartner, C. F. An exploration of 2D and 3D deep learning techniques for cardiac MR image segmentation / C. F. Baumgartner, L. M. Koch, M. Pollefeys, E. Konukoglu // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

50. Bednarz, W. Ultrasonic biometer and its usage in an assessment of periodontal soft tissue thickness and comparison of its measurement accuracy with a bone sounding method / W. Bednarz, A. Zielińska // *Dental and Medical Problems*. – 2011. – Vol. 48. – № 4. – P. 481-489.

51. Belikova, K. Deep negative volume segmentation / K. Belikova, O. Y. Rogov, A. Rybakov [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 16292.

52. Bernard, G. Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods / G. Bernard, P. Rompré, J. R. Tavares, A. Montpetit // *Head and Face Medicine*. – 2020. – Vol. 16. – № 1.

53. Bilello, G. Accuracy evaluation of orthodontic movements with aligners: a prospective observational study / G. Bilello, M. Fazio, E. Amato [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2022. – Vol. 23. – № 1.

54. Borda, A. F. Outcome assessment of orthodontic clear aligner vs fixed appliance treatment in a teenage population with mild malocclusions / A. F. Borda, J. S. Garfinkle, D. A. Covell [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2020. – Vol. 90. – № 4. – P. 485-490.

55. Boubakri, A. Investigations on hygrothermal aging of thermoplastic polyurethane material / A. Boubakri, K. Elleuch, N. Guermazi, H. F. Ayedi // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30. – № 10.

56. Bowman, S. J. Creative adjuncts for clear aligners, part 1: Class II treatment / S. J. Bowman, F. Celenza, J. Sparaga [et al.] // *J Clin Orthod*. – 2015. – Vol. 49. – № 2. – P. 83-94.

57. Bowman, S. J. Creative adjuncts for clear aligners, part 2: Intrusion, rotation, and extrusion / S. J. Bowman, F. Celenza, J. Sparaga [et al.] // *J Clin Orthod*. – 2015. – Vol. 49. – № 3. – P. 162-172.

58. Bowman, S. J. Creative adjuncts for clear aligners, part 3: Extraction and interdisciplinary treatment / S. J. Bowman, F. Celenza, J. Sparaga [et al.] // *Journal of clinical orthodontics : JCO*. – 2015. – Vol. 49. – № 4. – P. 249-262.

59. Bowman, S. J. Improving the predictability of clear aligners / S. J. Bowman // *Seminars in Orthodontics*. – 2017. – Vol. 23. – № 1.

60. Brown, R. A. Large Strain Deformation of PETG at Processing Temperatures / R. A. Brown. – 2000.

61. Bucci, R. Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: a prospective clinical study / R. Bucci, R. Rongo, C. Levatè [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2019. – Vol. 20. – № 1.

62. Can, E. In-house 3D-printed aligners: effect of in vivo ageing on mechanical properties / E. Can, N. Panayi, G. Polychronis [et al.] // *European journal of orthodontics*. – 2022. – Vol. 44. – № 1.

63. Caruana, R. An Empirical Comparison of Supervised Learning Algorithms / R. Caruana, A. Niculescu-Mizil // *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning - ICML '06*. – 2006. – Vol. 2006. – P. 161-168.

64. Carvajal-Flórez, A. Orthodontic treatment outcomes obtained by application of a finishing protocol / A. Carvajal-Flórez, D. M. Barbosa-Lis, O. A. Zapata-Noreña [et al.] // *Dental Press Journal of Orthodontics*. – 2016. – Vol. 21. – № 2. – P. 88-94.
65. Castroflorio, T. Effects of clear aligners on sleep bruxism: Randomized controlled trial / T. Castroflorio, A. Bargellini, A. Lucchese [et al.] // *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*. – 2018. – Vol. 32. – № 2.
66. Castroflorio, T. Effects on sleep bruxism activity of clear aligners detected with nocturnal instrumental recordings / T. Castroflorio, A. Bargellini, A. Lucchese [et al.] // <https://trialssearch.who.int/Trial2.aspx?TrialID=ISRCTN12654415>. – 2017.
67. Castroflorio, T. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design / T. Castroflorio, A. Sedran, S. Parrini [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2023. – Vol. 24. – № 1.
68. Cattaneo, P. M. The finite element method: A tool to study orthodontic tooth movement / P. M. Cattaneo, M. Dalstra, B. Melsen // *Journal of Dental Research*. – 2005. – Vol. 84. – № 5.
69. Chen, C. Improving the Generalizability of Convolutional Neural Network-Based Segmentation on CMR Images / C. Chen, W. Bai, R. H. Davies [et al.] // *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. – 2020. – Vol. 7.
70. Chen, C. Multi-task Learning for Left Atrial Segmentation on GE-MRI / C. Chen, W. Bai, D. Rueckert // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – Vol. 11395 LNCS.
71. Chen, C. Learning Shape Priors for Robust Cardiac MR Segmentation from Multi-view Images / C. Chen, C. Biffi, G. Tarroni [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – Vol. 11765 LNCS.

72. Chen, L. C. Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation Liang-Chieh / L. C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 40. – № 4.

73. Chen, M. FR-NET: Focal loss constrained deep residual networks for segmentation of cardiac MRI / M. Chen, L. Fang, H. Liu // Proceedings - International Symposium on Biomedical Imaging. – 2019. – Vols. 2019-April.

74. Chen, S. Med3D: Transfer Learning for 3D Medical Image Analysis / S. Chen, K. Ma, Y. Zheng. – 2019.

75. Chen, S. Machine learning in orthodontics: Introducing a 3D auto-segmentation and auto-landmark finder of CBCT images to assess maxillary constriction in unilateral impacted canine patients / S. Chen, L. Wang, G. Li [et al.] // Angle Orthodontist. – 2020. – Vol. 90. – № 1. – P. 77-84.

76. Chen, X. Generative Adversarial U-Net for Domain-free Medical Image Augmentation / X. Chen, Y. Li, L. Yao [et al.]. – 2021. – P. 1.

77. Chen, Y. Automatic Segmentation of Individual Tooth in Dental CBCT Images from Tooth Surface Map by a Multi-Task FCN / Y. Chen, H. Du, Z. Yun [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – № April 2022. – P. 97296-97309.

78. Chung, M. Pose-aware instance segmentation framework from cone beam CT images for tooth segmentation / M. Chung, M. Lee, J. Hong [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2020. – Vol. 120.

79. Çiçek, Ö. 3D U-net: Learning dense volumetric segmentation from sparse annotation / Ö. Çiçek, A. Abdulkadir, S. S. Lienkamp [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – Vol. 9901 LNCS.

80. Çiğla, C. Region-based image segmentation via graph cuts / C. Çiğla, A. A. Alatan // Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP. – 2008.

81. Clough, J. R. Explicit Topological Priors for Deep-Learning Based Image Segmentation Using Persistent Homology / J. R. Clough, I. Oksuz, N. Byrne [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11492 LNCS.

82. Condo', R. Mechanical properties of “two generations” of teeth aligners: Change analysis during oral permanence / R. Condo', L. Pazzini, L. Cerroni [et al.] // Dental Materials Journal. – 2018. – Vol. 37. – № 5.

83. Cong, C. Invert-U-Net DNN segmentation model for MRI cardiac left ventricle segmentation / C. Cong, H. Zhang // The Journal of Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – № 16.

84. Cortona, A. Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study / A. Cortona, G. Rossini, S. Parrini [et al.] // The Angle Orthodontist. – 2020. – Vol. 90. – № 2. – P. 247-254.

85. Cui, Z. Toothnet: Automatic tooth instance segmentation and identification from cone beam ct images / Z. Cui, C. Li, W. Wang // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – Vols. 2019-June. – № 3. – P. 6361-6370.

86. Cuny-Houchmand, M. Gingival Biotype Assesment: Visual Inspection Relevance And Maxillary Versus Mandibular Comparison / M. Cuny-Houchmand, S. Renaudin, M. Leroul [et al.] // The Open Dentistry Journal. – 2013. – Vol. 7. – № 1. – P. 1-6.

87. D'Antò, V. The Predictability of Transverse Changes in Patients Treated with Clear Aligners / V. D'Antò, R. Valletta, L. Di Mauro [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16. – № 5.

88. Dou, Q. Automatic lesion detection with three-dimensional convolutional neural networks / Q. Dou, H. Chen, J. Qin, P.-A. Heng // *Biomedical Information Technology*. – 2020.

89. Duan, J. Deep Nested Level Sets: Fully Automated Segmentation of Cardiac MR Images in Patients with Pulmonary Hypertension / J. Duan, J. Schlemper, W. Bai [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 11073 LNCS.

90. Duchi, J. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization / J. Duchi, E. Hazan, Y. Singer // *Journal of Machine Learning Research*. – 2011. – Vol. 12.

91. Duong, T. Finishing with invisalign. / T. Duong, E. Kuo // *Progress in orthodontics*. – 2006. – Vol. 7. – № 1.

92. Dupaix, R. B. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG) / R. B. Dupaix, M. C. Boyce // *Polymer*. – 2005. – Vol. 46. – № 13. – P. 4827-4838.

93. Edelmann, A. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners / A. Edelmann, J. D. English, S. J. Chen, F. K. Kasper // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2020. – Vol. 158. – № 5.

94. Eliades, T. Orthodontic aligner treatment: a review of materials, clinical management, and evidence / T. Eliades, A. E. Athanasiou. – 2021. – 186 p.

95. Eliades, T. The use of attachments in aligner treatment: Analyzing the “innovation” of expanding the use of acid etching–mediated bonding of composites to enamel and its consequences / T. Eliades, S. N. Papageorgiou, A. J. Ireland // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2020. – Vol. 158. – № 2.

96. Elkholy, F. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation / F. Elkholy, T. Panchaphongsaphak, F. Kilic [et al.] // *J Orofac Orthop.* – 2015. – Vol. 76. – № 6. – P. 460-475.

97. Erke Wang, T. N. Back to elements-tetrahedra vs. hexahedra / T. N. Erke Wang, R. Rauch // *Proceedings of the 2004 international ANSYS conference.* – 2004.

98. Faber, J. Artificial intelligence in orthodontics / J. Faber, C. Faber, P. Faber // *APOS Trends in Orthodontics.* – 2019. – Vol. 9. – № 4. – P. 201-205.

99. Fahmy, A. S. Automated analysis of cardiovascular magnetic resonance myocardial native T1 mapping images using fully convolutional neural networks / A. S. Fahmy, H. El-Rewaidy, M. Nezafat [et al.] // *Journal of cardiovascular magnetic resonance : official journal of the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance.* – 2019. – Vol. 21. – № 1.

100. Fahmy, A. S. Three-dimensional deep convolutional neural networks for automated myocardial scar quantification in hypertrophic cardiomyopathy: A multicenter multivendor study / A. S. Fahmy, U. Neisius, R. H. Chan [et al.] // *Radiology.* – 2020. – Vol. 294. – № 1.

101. Fan, Y. Marker-based watershed transform method for fully automatic mandibular segmentation from CBCT images / Y. Fan, R. Beare, H. Matthews [et al.] // *Dentomaxillofacial Radiology.* – 2019. – Vol. 48. – № 2.

102. Farrag, N. A. Evaluation of fully automated myocardial segmentation techniques in native and contrast-enhanced T1-mapping cardiovascular magnetic resonance images using fully convolutional neural networks / N. A. Farrag, A. Lochbihler, J. A. White, E. Ukwatta // *Medical physics.* – 2021. – Vol. 48. – № 1. – P. 215-226.

103. FayyazAhamed, S. Cytotoxic evaluation of directly 3D printed aligners and Invisalign / S. FayyazAhamed, S. M. Kumar, R. K. Vijayakumar [et al.] // *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. – 2020. – Vol. 7. – № 5.
104. Fiori, A. Predictability of crowding resolution in clear aligner treatment / A. Fiori, G. Minervini, L. Nucci [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2022. – Vol. 23. – № 1.
105. Fischer, K. R. Gingival biotype revisited — novel classification and assessment tool / K. R. Fischer, A. Künzlberger, N. Donos [et al.]. – 2017.
106. Fischer, K. R. Gingival biotype revisited—novel classification and assessment tool / K. R. Fischer, A. Künzlberger, N. Donos [et al.] // *Clinical Oral Investigations*. – 2018. – Vol. 22. – № 1. – P. 443-448.
107. Fischer, K. R. On the relationship between gingival biotypes and gingival thickness in young Caucasians / K. R. Fischer. – 2014. – № 2009. – P. 865-869.
108. Frick, A. Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC) / A. Frick, A. Rochman // *Polymer Testing*. – 2004. – Vol. 23. – № 4. – P. 413-417.
109. Fu, J.-H. Tissue Biotype and Its Relation to the Underlying Bone Morphology / J.-H. Fu, C.-Y. Yeh, H.-L. Chan [et al.] // *Journal of Periodontology*. – 2010. – Vol. 81. – № 4. – P. 569-574.
110. Fu, M. Hierarchical combinatorial deep learning architecture for pancreas segmentation of medical computed tomography cancer images / M. Fu, W. Wu, X. Hong [et al.] // *BMC Systems Biology*. – 2018. – Vol. 12.
111. Fuhrer, R. S. A comparative finite element analysis of maxillary expansion with and without midpalatal suture viscoelasticity using a representative skeletal geometry / R. S. Fuhrer, D. L. Romanyk, J. P. Carey // *Sci Rep*. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – P. 8476.



112. Fujiyama, K. Analysis of pain level in cases treated with Invisalign aligner: Comparison with fixed edgewise appliance therapy / K. Fujiyama, T. Honjo, M. Suzuki [et al.] // Progress in Orthodontics. – 2014. – Vol. 15. – № 1.
113. Gan, Y. Tooth and Alveolar Bone Segmentation From Dental Computed Tomography Images / Y. Gan, Z. Xia, J. Xiong [et al.] // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. – 2018. – Vol. 22. – № 1. – P. 196-204.
114. Ganaye, P. A. Removing segmentation inconsistencies with semi-supervised non-adjacency constraint / P. A. Ganaye, M. Sdika, B. Triggs, H. Benoit-Cattin // Medical Image Analysis. – 2019. – Vol. 58.
115. Genina, E. A. Phototherapy of gingivitis: Pilot clinical study / E. A. Genina, V. A. Titorenko, V. V. Tuchin [et al.] // Journal of Innovative Optical Health Sciences. – 2011. – Vol. 4. – № 4. – P. 437-446.
116. Gerard Bradley, T. Do the mechanical and chemical properties of Invisalign™ appliances change after use? A retrieval analysis / T. Gerard Bradley, L. Teske, G. Eliades [et al.] // European Journal of Orthodontics. – 2016. – Vol. 38. – № 1.
117. Gheller, C. Deep learning based detection of cosmological diffuse radio sources / C. Gheller, F. Vazza, A. Bonafede // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Vol. 480. – № 3.
118. Gibson, E. Automatic Multi-Organ Segmentation on Abdominal CT with Dense V-Networks / E. Gibson, F. Giganti, Y. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2018. – Vol. 37. – № 8.
119. Gilmour legilmou, L. Locating Cephalometric X-Ray Landmarks with Foveated Pyramid Attention / L. Gilmour legilmou, ualbertaca Nilanjan Ray nray. – 2020.

120. Gkantidis, N. The orthodontic–periodontic interrelationship in integrated treatment challenges: a systematic review / N. Gkantidis, P. Christou, N. Topouzelis // *Journal of Oral Rehabilitation*. – 2010. – Vol. 37. – № 5. – P. 377-390.

121. Glide-Hurst, C. Changes realized from extended bit-depth and metal artifact reduction in CT / C. Glide-Hurst, D. Chen, H. Zhong, I. J. Chetty // *Medical Physics*. – 2013. – Vol. 40. – № 6. – P. 061711.

122. Glorot, X. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks / X. Glorot, Y. Bengio // *Journal of Machine Learning Research*. – 2010. – Vol. 9.

123. Gomez, J. P. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis / J. P. Gomez, F. M. Peña, V. Martínez [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2015. – Vol. 85. – № 3. – P. 454-460.

124. Goodfellow, I. Generative adversarial networks / I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza [et al.] // *Communications of the ACM*. – 2020. – Vol. 63. – № 11.

125. Gordienko, Y. Deep learning with lung segmentation and bone shadow exclusion techniques for chest X-ray analysis of lung cancer / Y. Gordienko, P. Gang, J. Hui [et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 754.

126. Goto, M. A method for evaluation of the effects of attachments in aligner-type orthodontic appliance: Three-dimensional finite element analysis / M. Goto, W. Yanagisawa, H. Kimura [et al.] // *Orthodontic Waves*. – 2017. – Vol. 76. – № 4.

127. Hahn, W. The influence of occlusal forces on force delivery properties of aligners during rotation of an upper central incisor / W. Hahn, B. Engelke, K. Jung [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2011. – Vol. 81. – № 6.

128. Hallmann, L. Effect of Dental Thermoplastic Materials on the Clinical Effectiveness of Clear Aligner / L. Hallmann, M. Gerngroß // Austin Journal of Dentistry. – 2021. – Vol. 8. – № 1. – P. 40-42.

129. Handbook of Polycarbonate Science and Technology. – 1999.

130. Hansa, I. Outcomes of clear aligner treatment with and without Dental Monitoring: A retrospective cohort study / I. Hansa, V. Katyal, D. J. Ferguson, N. Vaid // American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. – 2021. – Vol. 159. – № 4. – P. 453-459.

131. Hasan, I. Radiographic evaluation of bone density around immediately loaded implants / I. Hasan, M. Dominiak, A. Blaszczyzyn [et al.] // Annals of Anatomy. – 2015. – Vol. 199. – P. 52-57.

132. Hasan, M. K. DSNet: Automatic dermoscopic skin lesion segmentation / M. K. Hasan, L. Dahal, P. N. Samarakoon [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2020. – Vol. 120.

133. Havaei, M. Brain tumor segmentation with Deep Neural Networks / M. Havaei, A. Davy, D. Warde-Farley [et al.] // Medical Image Analysis. – 2017. – Vol. 35.

134. Hayashi, K. A novel method for the three-dimensional (3-D) analysis of orthodontic tooth movement - Calculation of rotation about and translation along the finite helical axis / K. Hayashi, Y. Araki, J. Uechi [et al.] // Journal of Biomechanics. – 2002. – Vol. 35. – № 1.

135. He, K. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – Vols. 2016-Decem.

136. He, K. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. – 2015. – Vol. 2015 Inter. – P. 1026-1034.

137. Hegazy, M. A. A. U-net based metal segmentation on projection domain for metal artifact reduction in dental CT / M. A. A. Hegazy, M. H. Cho, M. H. Cho, S. Y. Lee // *Biomedical Engineering Letters*. – 2019. – Vol. 9. – № 3. – P. 375-385.
138. Hennessy, J. Clear aligners generations and orthodontic tooth movement / J. Hennessy, E. A. Al-Awadhi // *Journal of Orthodontics*. – 2016. – Vol. 3125. – № January. – P. 1-9.
139. Heo, H. Segmentation of tooth in CT images for the 3D reconstruction of teeth / H. Heo, O.-S. Chae // *Image Processing: Algorithms and Systems III*. – 2004. – Vol. 5298.
140. Heo, M.-S. Artificial intelligence in oral and maxillofacial radiology: what is currently possible? / M.-S. Heo, J.-E. Kim, J.-J. Hwang [et al.] // *Dentomaxillofacial Radiology*. – 2021. – Vol. 50. – № 3.
141. Hinton, G. E. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors / G. E. Hinton, N. Srivastava, A. Krizhevsky [et al.]. – 2012.
142. Hochreiter, S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation*. – 1997. – Vol. 9. – № 8. – P. 1735-1780.
143. Hou, D. The effect of digital diagnostic setups on orthodontic treatment planning / D. Hou, R. Capote, B. Bayirli [et al.] // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2020. – Vol. 157. – № 4. – P. 542-549.
144. Hounsfield, G. N. Computed medical imaging. Nobel lecture, Decemberr 8, 1979 / G. N. Hounsfield // *Journal of Computer Assisted Tomography*. – 1980. – Vol. 4. – № 5. – P. 665-674.
145. Hu, J. Squeeze-and-Excitation Networks / J. Hu, L. Shen, S. Albanie [et al.] // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2020. – Vol. 42. – № 8.

146. Hu, P. Automatic abdominal multi-organ segmentation using deep convolutional neural network and time-implicit level sets / P. Hu, F. Wu, J. Peng [et al.] // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. – 2017. – Vol. 12. – № 3.

147. Hung, H.-C. Applications of Artificial Intelligence in Orthodontics / H.-C. Hung, Y.-C. Wang, Y.-C. Wang // *Taiwanese Journal of Orthodontics*. – 2020. – Vol. 32. – № 2.

148. Ihssen, B. A. Effect of in vitro aging by water immersion and thermocycling on the mechanical properties of PETG aligner material / B. A. Ihssen, J. H. Willmann, A. Nimer, D. Drescher // *Journal of Orofacial Orthopedics*. – 2019. – Vol. 80. – № 6.

149. Im, J. Comparison of virtual and manual tooth setups with digital and plaster models in extraction cases / J. Im, J. Y. Cha, K. J. Lee [et al.] // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2014. – Vol. 145. – № 4. – P. 434-442.

150. Im, J. Accuracy and efficiency of automatic tooth segmentation in digital dental models using deep learning / J. Im, J. Y. Kim, H. S. Yu [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 1-11.

151. Imber, J. C. Treatment of Gingival Recession: When and How? / J. C. Imber, A. Kasaj // *International Dental Journal*. – 2021. – Vol. 71. – № 3. – P. 178-187.

152. Ioffe, S. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift / S. Ioffe, C. Szegedy // *32nd International Conference on Machine Learning, ICML 2015*. – 2015. – Vol. 1.

153. Isensee, F. Automatic Cardiac Disease Assessment on cine-MRI via Time-Series Segmentation and Domain Specific Features : *Lecture Notes in Computer Science* / F. Isensee, P. Jaeger, P. M. Full [et al.]. – 2017. – Vol. 10663.

154. Jaggy, F. ATR-FTIR analysis and one-week stress relaxation of four orthodontic aligner materials / F. Jaggy, S. Zinelis, G. Polychronis [et al.] // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – № 8.

155. Jalladaud, M. How to analyze periodontal morphotypes in order to reduce the risk of periodontal recession / M. Jalladaud, M. Lahmi, C. Lallam. – 2017. – P. 95-103.

156. Jang, Y. Automatic segmentation of LV and RV in cardiac MRI / Y. Jang, Y. Hong, S. Ha [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

157. Jepsen, S. Periodontal manifestations of systemic diseases and developmental and acquired conditions: Consensus report of workgroup 3 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions / S. Jepsen, J. G. Caton, J. M. Albandar [et al.] // *Journal of periodontology*. – 2018. – Vol. 89. – P. S237-S248.

158. Jindal, P. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners / P. Jindal, M. Juneja, F. L. Siena [et al.] // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2019. – Vol. 156. – № 5.

159. Jones, M. L. A validated finite element method study of orthodontic tooth movement in the human subject / M. L. Jones, J. Hickman, J. Middleton [et al.] // *Journal of Orthodontics*. – 2001. – Vol. 28. – № 1.

160. Joshi, N. Gingival Biotype and Gingival Bioform : Determining Factors for Periodontal Disease Progression and Treatment Outcome / N. Joshi, M. C. Agarwal, E. Madan [et al.]. – 2016. – Vol. 4. – № 3. – P. 220-225.

161. Joshi, N. Gingival Biotype and Gingival Bioform: Determining Factors for Periodontal Disease Progression and Treatment Outcome / N. Joshi, M. Chandra, E.

Madan [et al.] // International Journal of Scientific Study. – 2016. – Vol. 4. – № 3. – P. 220-225.

162. Kan, J. Y. K. Dimensions of Peri-Implant Mucosa: An Evaluation of Maxillary Anterior Single Implants in Humans Case series / J. Y. K. Kan, K. Rungcharassaeng, K. Umezumi, J. C. Kois. – 2003. – № April. – P. 18-20.

163. Kapila, S. D. CBCT in orthodontics: Assessment of treatment outcomes and indications for its use. Vol. 44 / S. D. Kapila, J. M. Nervina. – 2015.

164. Karras, T. Efficacy of Invisalign attachments: A retrospective study / T. Karras, M. Singh, E. Karkazis [et al.] // American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. – 2021. – Vol. 160. – № 2.

165. Ke, Y. A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies / Y. Ke, Y. Zhu, M. Zhu // BMC Oral Health. – 2019. – Vol. 19. – № 1.

166. Khened, M. Fully convolutional multi-scale residual DenseNets for cardiac segmentation and automated cardiac diagnosis using ensemble of classifiers / M. Khened, V. A. Kollerathu, G. Krishnamurthi // Medical Image Analysis. – 2019. – Vol. 51.

167. Kim, T. Tooth Segmentation of 3D Scan Data Using Generative Adversarial Networks / T. Kim, Y. Cho, D. Kim [et al.] // Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 490. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 490.

168. Kingma, D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. L. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings. – 2015.

169. Kleesiek, J. ilastik for Multi-modal Brain Tumor Segmentation / J. Kleesiek, A. Biller, G. Urban [et al.] // BraTS Challenge Manuscripts, MICCAI 2014. – 2014.

170. Ko, H. C. Recommendations for clear aligner therapy using digital or plaster study casts / H. C. Ko, W. Liu, D. Hou [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2018. – Vol. 19. – № 1.

171. Kohda, N. Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances / N. Kohda, M. Iijima, T. Muguruma [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2013. – Vol. 83. – № 3.

172. Kolte, R. Assessment of gingival thickness with regards to age, gender and arch location / R. Kolte, A. Kolte, A. Mahajan // *Journal of Indian Society of Periodontology*. – 2014. – Vol. 18. – № 4. – P. 478-481.

173. Kononova, O. V. Features of treatment of patients with generalized periodontitis with manifestations of psychoemotional stress / O. V. Kononova, A. V. Borysenko, V. M. Batig, M. I. Sheremet // *Romanian Journal of Stomatology*. – 2019. – Vol. 65. – № 4. – P. 371-375.

174. Kravitz, N. D. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign / N. D. Kravitz, B. Kusnoto, E. BeGole [et al.] // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2009. – Vol. 135. – № 1.

175. Kundal, S. Aligners: The Science of Clear Orthodontics / S. Kundal // *International Journal of Dental and Medical Specialty*. – 2020. – Vol. 7. – № 1.

176. Kusy, R. P. Influence of force systems on archwire-bracket combinations / R. P. Kusy // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2005. – Vol. 127. – № 3.

177. Kwon, J. S. Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials / J. S. Kwon, Y. K. Lee, B. S. Lim, Y. K. Lim // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2008. – Vol. 133. – № 2.



178. Lachapelle, D. Measurement of Gingivitis among School-Age Children in Brantford, Sarnia, and Stratford, using the P-M-A Index / D. Lachapelle, J. Sévigny, J.-M. Brodeur, C. Couture // *Canadian Journal of Public Health*. – 1990. – Vol. 81. – № 5. – P. 370-375.

179. Lau, F. ScarGAN: Chained Generative Adversarial Networks to Simulate Pathological Tissue on Cardiovascular MR Scans / F. Lau, T. Hendriks, J. Lieman-Sifry [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 11045 LNCS. – P. 343-350.

180. Lechuga, L. Cone Beam CT vs. Fan Beam CT: A Comparison of Image Quality and Dose Delivered Between Two Differing CT Imaging Modalities / L. Lechuga, G. A. Weidlich // *Cureus*. – 2016. – Vol. 8. – № 9.

181. Lee, C. Y. Deeply-supervised nets / C. Y. Lee, S. Xie, P. W. Gallagher [et al.] // *Journal of Machine Learning Research*. – 2015. – Vol. 38.

182. Lee, S. Automated CNN-Based tooth segmentation in cone-beam CT for dental implant planning / S. Lee, S. Woo, J. Yu [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 50507-50518.

183. Li, J. Dilated-inception net: Multi-scale feature aggregation for cardiac right ventricle segmentation / J. Li, Z. L. Yu, Z. Gu [et al.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2019. – Vol. 66. – № 12.

184. Li, W. Structured Landmark Detection via Topology-Adapting Deep Graph Learning / W. Li, Y. Lu, K. Zheng [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2020. – Vol. 12354 LNCS. – P. 266-283.

185. Lian, C. Deep Multi-Scale Mesh Feature Learning for Automated Labeling of Raw Dental Surfaces from 3D Intraoral Scanners / C. Lian, L. Wang, T. H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2020. – Vol. 39. – № 7. – P. 2440-2450.

186. Liao, F. Estimation of the Volume of the Left Ventricle From MRI Images Using Deep Neural Networks / F. Liao, X. Chen, X. Hu, S. Song // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2017. – Vol. 49. – № 2.

187. Litjens, G. Evaluation of prostate segmentation algorithms for MRI: The PROMISE12 challenge / G. Litjens, R. Toth, W. van de Ven [et al.] // Medical Image Analysis. – 2014. – Vol. 18. – № 2.

188. Liu, C. L. Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents / C. L. Liu, W. T. Sun, W. Liao [et al.] // International Journal of Oral Science. – 2016. – Vol. 8. – № 4.

189. Lombardo, L. Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study / L. Lombardo, A. Arreghini, F. Ramina [et al.] // Progress in Orthodontics. – 2017. – Vol. 18. – № 1.

190. Lombardo, L. Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study / L. Lombardo, E. Martines, V. Mazzanti [et al.] // Angle Orthodontist. – 2017. – Vol. 87. – № 1.

191. Lombardo, L. MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: an in-vitro study / L. Lombardo, M. Palone, M. Longo [et al.] // Progress in Orthodontics. – 2020. – Vol. 21. – № 1.

192. Long, H. An objective system for appraising clear aligner treatment difficulty: clear aligner treatment complexity assessment tool (CAT-CAT) / H. Long, Z. Wu, X. Yan [et al.] // BMC Oral Health. – 2020. – Vol. 20. – № 1.

193. Lu, Q. W. Comparing the compatibility of various functionalized polypropylenes with thermoplastic polyurethane (TPU) / Q. W. Lu, C. W. Macosko // *Polymer*. – 2004. – Vol. 45. – № 6.

194. Lu, Q. W. Comparing the compatibility of various functionalized polypropylenes with thermoplastic polyurethane (TPU) / Q. W. Lu, C. W. Macosko // *Polymer*. – 2004. – Vol. 45. – № 6. – P. 1981-1991.

195. Lu, X. Graph cut segmentation of the right ventricle in cardiac MRI using multi-scale feature learning / X. Lu, X. Chen, W. Li, Y. Qiao // *ACM International Conference Proceeding Series*. – 2019.

196. Luc, P. Semantic Segmentation using Adversarial Networks / P. Luc, C. Couprie, S. Chintala, J. Verbeek. – 2016.

197. Luis, F. The insider's Guide to Invisalign Treatment / F. Luis, G. Moncayo.

198. Madenci, E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®. Vol. 3 / E. Madenci, I. Guven. – Boston, MA : Springer US, 2015. – 54-67 p.

199. Malpartida-Carrillo, V. Periodontal phenotype: A review of historical and current classifications evaluating different methods and characteristics. Vol. 33 / V. Malpartida-Carrillo, P. L. Tinedo-Lopez, M. E. Guerrero, [et al.]. – John Wiley and Sons Inc, 2021.

200. Mampieri, G. Treatment of impacted canines with aligners: An alternative and viable option / G. Mampieri, T. Castroflorio, A. Conigliaro, A. Giancotti // *Clinical Case Reports*. – 2021. – Vol. 9. – № 9.

201. Martin, D. J. Thermoplastic polyurethane (TPU)-based polymer nanocomposites / D. J. Martin, A. F. Osman, Y. Andriani, G. A. Edwards // *Advances in Polymer Nanocomposites: Types and Applications*. – 2012.

202. Martina, S. In vitro cytotoxicity of different thermoplastic materials for clear aligners / S. Martina, R. Rongo, R. Bucci [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 2019. – Vol. 89. – № 6.

203. Masella, R. S. The neuroanatomic basis of facial perception and variable facial discrimination ability: Implications for orthodontics / R. S. Masella, M. Meister // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2007. – Vol. 132. – № 3. – P. 293-301.

204. Math, M. V. Bridging to medicine / M. V. Math, Y. R. Kattimani, R. M. Khadkikar // *British Dental Journal* 2016 220:10. – 2016. – Vol. 220. – № 10. – P. 500-500.

205. McGuinness, N. Stresses induced by edgewise appliances in the periodontal ligament--a finite element study. / N. McGuinness, A. N. Wilson, M. Jones [et al.] // *Angle Orthodontist*. – 1992. – Vol. 62. – № 1.

206. Medley, D. O. Segmenting the left ventricle in cardiac in cardiac MRI: From handcrafted to deep region based descriptors / D. O. Medley, C. Santiago, J. C. Nascimento // *Proceedings - International Symposium on Biomedical Imaging*. – 2019. – Vols. 2019-April.

207. Memon, S. A comparative evaluation of the reliability of three methods of assessing gingival biotype in dentate subjects in different age groups: An in vivo study / S. Memon, J. R. Patel, R. Sethuraman [et al.] // *Journal of Indian Prosthodontist Society*. – 2015. – Vol. 15. – № 4. – P. 313-317.

208. Menze, B. H. The Multimodal Brain Tumor Image Segmentation Benchmark (BRATS) / B. H. Menze, A. Jakab, S. Bauer [et al.] // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. – 2015. – Vol. 34. – № 10.

209. MG, N. Newman and Carranza's Clinical Periodontology / N. MG. – Elsevier Health Sciences, 2014. – 635-648 p.

210. Milletari, F. V-Net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation / F. Milletari, N. Navab, S. A. Ahmadi // Proceedings - 2016 4th International Conference on 3D Vision, 3DV 2016. – 2016.

211. Mishkin, D. All you need is a good init / D. Mishkin, J. Matas // 4th International Conference on Learning Representations, ICLR 2016 - Conference Track Proceedings. – 2016.

212. Moccia, S. Development and testing of a deep learning-based strategy for scar segmentation on CMR-LGE images / S. Moccia, R. Banali, C. Martini [et al.] // Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine. – 2019. – Vol. 32. – № 2.

213. Moeskops, P. Deep learning for multi-task medical image segmentation in multiple modalities / P. Moeskops, J. M. Wolterink, B. H. M. van der Velden [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – Vol. 9901 LNCS.

214. Morris, R. S. Accuracy of Dental Monitoring 3D digital dental models using photograph and video mode / R. S. Morris, L. N. Hoye, M. H. Elnagar [et al.] // American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. – 2019. – Vol. 156. – № 3. – P. 420-428.

215. Müller, H. P. Gingival phenotypes in young male adults / H. P. Müller // Journal of Clinical Periodontology. – 1997. – Vol. 24. – № 1. – P. 65-71.

216. Müller, H. P. Masticatory mucosa in subjects with different periodontal phenotypes / H. P. Müller, A. Heinecke, N. Schaller, T. Eger // Journal of Clinical Periodontology. – 2000. – Vol. 27. – № 9. – P. 621-626.

217. Ngo, T. A. Combining deep learning and level set for the automated segmentation of the left ventricle of the heart from cardiac cine magnetic resonance / T. A. Ngo, Z. Lu, G. Carneiro // Medical Image Analysis. – 2017. – Vol. 35.

218. Nimwegen, W. G. van. Immediate placement and provisionalization of implants in the aesthetic zone with or without a connective tissue graft: A 1-year randomized controlled trial and volumetric study / W. G. van Nimwegen, G. M. Raghoobar, E. G. Zuiderveld [et al.] // *Clinical Oral Implants Research*. – 2018. – Vol. 29. – № 7. – P. 671-678.

219. Oktay, O. Multi-input cardiac image super-resolution using convolutional neural networks / O. Oktay, W. Bai, M. Lee [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2016. – Vol. 9902 LNCS.

220. Oktay, O. Anatomically Constrained Neural Networks (ACNNs): Application to Cardiac Image Enhancement and Segmentation / O. Oktay, E. Ferrante, K. Kamnitsas [et al.] // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. – 2018. – Vol. 37. – № 2.

221. Ossowska, A. Artificial Intelligence in Dentistry-Narrative Review / A. Ossowska, A. Kusiak, D. Świetlik // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Vol. 19. – № 6. – P. 3449.

222. Painchaud, N. Cardiac MRI Segmentation with Strong Anatomical Guarantees / N. Painchaud, Y. Skandarani, T. Judge [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – Vol. 11765 LNCS.

223. Papadopoulou, A. K. Changes in roughness and mechanical properties of Invisalign® appliances after one- and two-weeks use / A. K. Papadopoulou, A. Cantele, G. Polychronis [et al.] // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – № 15.

224. Park, S. Deep Learning-Based Automatic Segmentation of Mandible and Maxilla in Multi-Center CT Images / S. Park, H. Kim, E. Shim [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12. – № 3.

225. Pasciuti, E. Deep Bite Treatment with Aligners: A New Protocol / E. Pasciuti, G. Coloccia, A. D. Inchingolo [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12. – № 13. – P. 6709.

226. Patini, R. Clear aligners' effects on aesthetics: Evaluation of facial wrinkles / R. Patini, P. Gallenzi, S. Meuli [et al.] // Journal of Clinical and Experimental Dentistry. – 2018. – Vol. 10. – № 7. – P. e696-e701.

227. Patravali, J. 2D-3D fully convolutional neural networks for cardiac MR segmentation / J. Patravali, S. Jain, S. Chilamkurthy // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

228. Pauwels, R. CBCT-based bone quality assessment: Are Hounsfield units applicable? Vol. 44 / R. Pauwels, R. Jacobs, S. R. Singer, M. Mupparapu. – 2015.

229. Pauwels, R. CBCT-based bone quality assessment: are Hounsfield units applicable? / R. Pauwels, R. Jacobs, S. R. Singer, M. Mupparapu // Dento Maxillo Facial Radiology. – 2015. – Vol. 44. – CBCT-based bone quality assessment. – № 1. – P. 20140238.

230. Pereira, N. C. Frequency of awake bruxism behaviour in orthodontic patients: Randomised clinical trial: Awake bruxism behaviour in orthodontic patients / N. C. Pereira, P. V. P. Oltramari, P. C. R. Conti [et al.] // Journal of Oral Rehabilitation. – 2021. – Vol. 48. – № 4.

231. Pereira, S. Brain Tumor Segmentation Using Convolutional Neural Networks in MRI Images / S. Pereira, A. Pinto, V. Alves, C. A. Silva // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2016. – Vol. 35. – № 5.

232. Pernet, F. Long-term evaluation of lower incisors gingival recessions after orthodontic treatment / F. Pernet, C. Vento, N. Pandis, S. Kiliaridis // European Journal of Orthodontics. – 2019. – Vol. 41. – № 6. – P. 559-564.

233. Poudel, R. P. K. Recurrent fully convolutional neural networks for multi-slice MRI cardiac segmentation / R. P. K. Poudel, P. Lamata, G. Montana // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2017. – Vol. 10129 LNCS.

234. Prasoon, A. Deep feature learning for knee cartilage segmentation using a triplanar convolutional neural network / A. Prasoon, K. Petersen, C. Igel [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2013. – Vol. 8150 LNCS.

235. Pratto, I. Thermal and mechanical characterization of thermoplastic orthodontic aligners discs after molding process / I. Pratto, M. C. A. Busato, P. R. S. Bittencourt // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2022. – Vol. 126.

236. Qian, J. CephaNet: An improved faster r-cnn for cephalometric landmark detection / J. Qian, M. Cheng, Y. Tao [et al.] // Proceedings - International Symposium on Biomedical Imaging. – IEEE Computer Society, 2019. – Vols. 2019-April. – P. 868-871.

237. Qian, N. On the momentum term in gradient descent learning algorithms / N. Qian // Neural Networks. – 1999. – Vol. 12. – № 1.

238. Qin, C. Joint learning of motion estimation and segmentation for cardiac MR image sequences / C. Qin, W. Bai, J. Schlemper [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 11071 LNCS.

239. Raith, S. Artificial Neural Networks as a powerful numerical tool to classify specific features of a tooth based on 3D scan data / S. Raith, E. P. Vogel, N. Anees [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 80. – P. 65-76.



240. Rasperini, G. Influence of Periodontal Biotype on Root Surface Exposure During Orthodontic Treatment: A Preliminary Study / G. Rasperini, R. Acunzo, P. Cannalire, G. Farronato // *The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. – 2017. – Vol. 35. – № 5. – P. 655-675.

241. Rathee, M. Prevalence of Gingival Biotypes among Young Dentate North Indian Population: A Biometric Approach / M. Rathee, P. L. Rao, M. Bhorla // *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. – 2016. – Vol. 9. – № 2. – P. 104-108.

242. Real, A. Del. Use of automated artificial intelligence to predict the need for orthodontic extractions / A. Del Real, O. Del Real, S. Sardina, R. Oyonarte // *Korean Journal of Orthodontics*. – 2022. – Vol. 52. – № 2. – P. 102-111.

243. Ren, L. The predictability of orthodontic tooth movements through clear aligner among first-premolar extraction patients: a multivariate analysis / L. Ren, L. Liu, Z. Wu [et al.] // *Progress in Orthodontics*. – 2022. – Vol. 23. – № 1.

244. Retrouvey, J.-M. The role of AI and machine learning in contemporary orthodontics / J.-M. Retrouvey // *APOS Trends in Orthodontics*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 74-80.

245. Roberts-Harry, D. Orthodontics. Part 2: Patient assessment and examination I / D. Roberts-Harry, J. Sandy // *British Dental Journal* 2003 195:9. – 2003. – Vol. 195. – № 9. – P. 489-493.

246. Robertson, L. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: A systematic review. Vol. 23 / L. Robertson, H. Kaur, N. C. F. Fagundes, [et al.]. – 2020.

247. Ronneberger, O. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2015. – Vol. 9351.

248. Ronneberger, O. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2015. – Vol. 9351.

249. Roth, H. R. Deeporgan: Multi-level deep convolutional networks for automated pancreas segmentation / H. R. Roth, L. Lu, A. Farag [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2015. – Vol. 9349.

250. Rouck, T. De. The gingival biotype revisited: transparency of the periodontal probe through the gingival margin as a method to discriminate thin from thick gingiva / T. De Rouck, R. Eghba, K. Collys [et al.]. – 2009. – № February. – P. 428-433.

251. Rouck, T. De. The gingival biotype revisited: Transparency of the periodontal probe through the gingival margin as a method to discriminate thin from thick gingiva / T. De Rouck, R. Eghbali, K. Collys [et al.] // Journal of Clinical Periodontology. – 2009. – Vol. 36. – № 5. – P. 428-433.

252. Russo, P. Thermoplastic polyurethane films reinforced with carbon nanotubes: The effect of processing on the structure and mechanical properties / P. Russo, M. Lavorgna, F. Piscitelli [et al.] // European Polymer Journal. – 2013. – Vol. 49. – № 2.

253. Ryokawa, H. The mechanical properties of dental thermoplastic materials in a simulated intraoral environment / H. Ryokawa, Y. Miyazaki, A. Fujishima [et al.] // Orthodontic Waves. – 2006. – Vol. 65. – № 2.

254. Ryu, J. H. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners / J. H. Ryu, J. S. Kwon, H. B. Jiang [et al.] // Korean Journal of Orthodontics. – 2018. – Vol. 48. – № 5.

255. Sala, L. Comparative in vitro study of two methods for gingival biotype assessment / L. Sala, R. Alonso-Pérez, R. Agustin-Panadero [et al.] // *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*. – 2018. – Vol. 10. – № 9. – P. e858-e863.
256. Sander, J. Towards increased trustworthiness of deep learning segmentation methods on cardiac MRI / J. Sander, B. D. de Vos, J. M. Wolterink, I. Išgum. – 2019.
257. Sandler, H. C. Testing the uniformity of the P-M-A index as a measurement of periodontal disease / H. C. Sandler // *Journal of Dental Research*. – 1952. – Vol. 31. – № 3.
258. Savioli, N. A Generative Adversarial Model for Right Ventricle Segmentation / N. Savioli, M. S. Vieira, P. Lamata, G. Montana. – 2018.
259. Schaller, N. Ultrasonic determination of thickness of masticatory mucosa / N. Schaller, T. Eger // *Pathology*. – 1999. – P. 248-253.
260. Schuster, S. Structural conformation and leaching from in vitro aged and retrieved Invisalign appliances / S. Schuster, G. Eliades, S. Zinelis [et al.] // *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. – 2004. – Vol. 126. – № 6.
261. Sfondrini, M. F. New Materials and Techniques for Orthodontics / M. F. Sfondrini, A. Scribante // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – № 5.
262. Shah, H. K. Gingival Biotype Classification, Assessment, and Clinical Importance: A Review / H. K. Shah, S. Sharma, S. Shrestha // *Journal of Nepalese Society of Periodontology and Oral Implantology*. – 2020. – Vol. 4. – № 2. – P. 83-88.
263. Shah, R. Prevalence of gingival biotype and its relationship to clinical parameters / R. Shah, N. K. Sowmya, D. S. Mehta // *Contemporary Clinical Dentistry*. – 2015. – Vol. 6. – № 5. – P. S167-S171.
264. Shaikh, K. Artificial Intelligence in Dentistry / K. Shaikh, S. V. Bekal, H. F. A. Marei, [et al.]. – Springer Nature Switzerland AG, 2022. – 209 p.

265. Shalish, M. Adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Part I: A comparison between Labial, Lingual, and Invisalign™ / M. Shalish, R. Cooper-Kazaz, I. Ivgi [et al.] // *European Journal of Orthodontics*. – 2012. – Vol. 34. – № 6.

266. Shelhamer, E. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation / E. Shelhamer, J. Long, T. Darrell // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2017. – Vol. 39. – № 4.

267. Shi, B. An End-to-End Trainable Neural Network for Image-Based Sequence Recognition and Its Application to Scene Text Recognition / B. Shi, X. Bai, C. Yao // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2017. – Vol. 39. – № 11.

268. Singh, J. Correlation of gingival thickness with gingival width, probing depth, and papillary fill in maxillary anterior teeth in students of a dental college in Navi Mumbai / J. Singh, V. Rathod, P. Rao [et al.] // *Contemporary Clinical Dentistry*. – 2016. – Vol. 7. – № 4. – P. 535-538.

269. Smith, J. M. Predictability of lower incisor tip using clear aligner therapy / J. M. Smith, T. Weir, A. Kaang, M. Farella // *Progress in Orthodontics*. – 2022. – Vol. 23. – № 1.

270. Srivastava, N. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky [et al.] // *Journal of Machine Learning Research*. – 2014. – Vol. 15.

271. Szegedy, C. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia [et al.] // *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2015. – Vols. 07-12-June.

272. Tai, S. Clear aligner technique / S. Tai. – 2018.

273. Takahashi, S. On current trends in orthodontics / S. Takahashi // *Japanese dental journal*. – 1961. – Vol. 14.

274. Tan, L. K. Convolutional neural network regression for short-axis left ventricle segmentation in cardiac cine MR sequences / L. K. Tan, Y. M. Liew, E. Lim, R. A. McLaughlin // *Medical Image Analysis*. – 2017. – Vol. 39.

275. Tao, Q. Deep learning-based method for fully automatic quantification of left ventricle function from cine MR images: A multivendor, multicenter study / Q. Tao, W. Yan, Y. Wang [et al.] // *Radiology*. – 2019. – Vol. 290. – № 1.

276. Tao, S. Tooth CT Image Segmentation Method Based on the U-Net Network and Attention Module / S. Tao, Z. Wang // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. – 2022. – Vol. 2022.

277. Tartaglia, G. M. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: Current state and future possibilities. Vol. 14 / G. M. Tartaglia, A. Mapelli, C. Maspero, [et al.]. – 2021.

278. Tenovuo, J. Concentration of Thiocyanate and Ionizable Iodine in Saliva of Smokers and Nonsmokers / J. Tenovuo, K. K. Makinen // *Journal of Dental Research*. – 1976. – Vol. 55. – № 4. – P. 661-663.

279. Tran, P. V. A Fully Convolutional Neural Network for Cardiac Segmentation in Short-Axis MRI / P. V. Tran. – 2016.

280. Trullo, R. Joint segmentation of multiple thoracic organs in CT images with two collaborative deep architectures / R. Trullo, C. Petitjean, D. Nie [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2017. – Vol. 10553 LNCS.

281. Upadhyay, M. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. Vol. 11 / M. Upadhyay, S. A. Arqub. – 2022.

282. Vaid, N. R. Artificial Intelligence (AI) driven orthodontic care: A quest toward utopia? / N. R. Vaid // *Seminars in Orthodontics*. – 2021. – Vol. 27. – № 2. – P. 57-61.

283. Vaswani, A. Attention is all you need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2017. – Vols. 2017-Decem.

284. Venezia, P. Accuracy of orthodontic models prototyped for clear aligners therapy: A 3D imaging analysis comparing different market segments 3D printing protocols / P. Venezia, V. Ronsivalle, L. Rustico [et al.] // *Journal of Dentistry*. – 2022. – Vol. 124. – P. 104212.

285. Vesal, S. A multi-stage fully convolutional network for cardiac MRI segmentation / S. Vesal, A. Maier, N. Ravikumar. – 2019. – № May. – P. 1-11.

286. Vesal, S. Fully Automated 3D Cardiac MRI Localisation and Segmentation Using Deep Neural Networks / S. Vesal, A. Maier, N. Ravikumar // *Journal of Imaging*. – 2020. – Vol. 6. – № 7.

287. Vesal, S. Fully Automated 3D Cardiac MRI Localisation and Segmentation Using Deep Neural Networks / S. Vesal, A. Maier, N. Ravikumar // *Journal of Imaging*. – 2020. – Vol. 6. – № 7. – P. 0-19.

288. Vigneault, D. M.  $\Omega$ -Net (Omega-Net): Fully automatic, multi-view cardiac MR detection, orientation, and segmentation with deep neural networks / D. M. Vigneault, W. Xie, C. Y. Ho [et al.] // *Medical Image Analysis*. – 2018. – Vol. 48.

289. Vlachodimou, E. Is there an association between the gingival phenotype and the width of keratinized gingiva? A systematic review. Vol. 9 / E. Vlachodimou, I. Fragkioudakis, I. Vouros. – *Dent J (Basel)*, 2021.

290. Waard, O. de. The Prediction Accuracy of Digital Orthodontic Setups for the Orthodontic Phase before Orthognathic Surgery / O. de Waard, F. Baan, R. Bruggink [et al.] // *Journal of Clinical Medicine* 2022, Vol. 11, Page 6141. – 2022. – Vol. 11. – № 20. – P. 6141.

291. Wang, C. Automatic whole heart segmentation using deep learning and shape context / C. Wang, Ö. Smedby // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries*

Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

292. Wang, X. Supervised learning in spiking neural networks: A review of algorithms and evaluations / X. Wang, X. Lin, X. Dang // Neural Networks. – 2020. – Vol. 125. – Supervised learning in spiking neural networks. – P. 258-280.

293. Wang, Y. Organ at Risk Segmentation in Head and Neck CT Images Using a Two-Stage Segmentation Framework Based on 3D U-Net / Y. Wang, L. Zhao, M. Wang, Z. Song // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 144591-144602.

294. Weckmann, J. Influence of attachment bonding protocol on precision of the attachment in aligner treatments / J. Weckmann, S. Scharf, I. Graf [et al.] // Journal of Orofacial Orthopedics. – 2020. – Vol. 81. – № 1.

295. Weir, T. Clear aligners in orthodontic treatment / T. Weir // Australian Dental Journal. – 2017. – Vol. 62. – P. 58-62.

296. Weisinger, E. Microscopic and microrespirometer evaluation of the efficacy of the PMA index / E. Weisinger, J. H. Manhold, J. L. Doyle, K. Rustogi // Journal of periodontology. – 1970. – Vol. 41. – № 11. – P. 650-653.

297. Wilmes, B. Esthetic Class II treatment with the Beneslider and aligners. / B. Wilmes, M. Nienkemper, B. Ludwig [et al.] // Journal of clinical orthodontics : JCO. – 2012. – Vol. 46. – № 7. – P. 390-398.

298. Wolterink, J. M. Automatic segmentation and disease classification using cardiac cine MR images / J. M. Wolterink, T. Leiner, M. A. Viergever, I. Išgum // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

299. Wu, H. Automated left ventricular segmentation from cardiac magnetic resonance images via adversarial learning with multi-stage pose estimation network and

co-discriminator / H. Wu, X. Lu, B. Lei, Z. Wen // Medical image analysis. – 2021. – Vol. 68.

300. Xia, Q. Automatic 3D Atrial Segmentation from GE-MRIs Using Volumetric Fully Convolutional Networks / Q. Xia, Y. Yao, Z. Hu, A. Hao // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11395 LNCS.

301. Xiong, Z. Fully Automatic Left Atrium Segmentation From Late Gadolinium Enhanced Magnetic Resonance Imaging Using a Dual Fully Convolutional Neural Network / Z. Xiong, V. V. Fedorov, X. Fu [et al.] // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2019. – Vol. 38. – № 2.

302. Xu, A. Threshold-based level set method of image segmentation / A. Xu, L. Wang, S. Feng, Y. Qu // Proceedings - 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, ICINIS 2010. – 2010.

303. Xu, C. Direct delineation of myocardial infarction without contrast agents using a joint motion feature learning architecture / C. Xu, L. Xu, Z. Gao [et al.] // Medical Image Analysis. – 2018. – Vol. 50.

304. Xu, X. 3D Tooth Segmentation and Labeling Using Deep Convolutional Neural Networks / X. Xu, C. Liu, Y. Zheng // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2019. – Vol. 25. – № 7. – P. 2336-2348.

305. Xue, Y. A multi-path 2.5 dimensional convolutional neural network system for segmenting stroke lesions in brain MRI images / Y. Xue, F. G. Farhat, O. Boukrina [et al.] // NeuroImage: Clinical. – 2020. – Vol. 25.

306. Yan, W. Left Ventricle Segmentation via Optical-Flow-Net from Short-Axis Cine MRI: Preserving the Temporal Coherence of Cardiac Motion / W. Yan, Y. Wang, Z. Li [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 11073 LNCS.



307. Yang, H. Research on a segmentation and evaluation method combining tooth morphology features / H. Yang, S. Wang // *International Journal of Morphology*. – 2020. – Vol. 38. – № 5. – P. 1325-1329.

308. Yang, J. Autosegmentation for thoracic radiation treatment planning: A grand challenge at AAPM 2017 / J. Yang, H. Veeraraghavan, S. G. Armato [et al.] // *Medical Physics*. – 2018. – Vol. 45. – № 10.

309. Yang, X. Class-balanced deep neural network for automatic ventricular structure segmentation / X. Yang, C. Bian, L. Yu [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

310. Yang, X. Hybrid loss guided convolutional networks for whole heart parsing / X. Yang, C. Bian, L. Yu [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

311. Ye, C. Multi-depth fusion network for whole-heart CT image segmentation / C. Ye, W. Wang, S. Zhang, K. Wang // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7.

312. Yu, F. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions / F. Yu, V. Koltun // *4th International Conference on Learning Representations, ICLR 2016 - Conference Track Proceedings*. – 2016.

313. Yu, L. Volumetric convnets with mixed residual connections for automated prostate segmentation from 3d MR images / L. Yu, X. Yang, H. Chen [et al.] // *31st AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2017*. – 2017.

314. Yue, Q. Cardiac Segmentation from LGE MRI Using Deep Neural Network Incorporating Shape and Spatial Priors / Q. Yue, X. Luo, Q. Ye [et al.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – Vol. 11765 LNCS.

315. Zabihollahy, F. Myocardial scar segmentation from magnetic resonance images using convolutional neural network / F. Zabihollahy, J. A. White, E. Ukwatta. – 2018.
316. Zhang, J. LU-NET: An improved U-net for ventricular segmentation / J. Zhang, J. Du, H. Liu [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7.
317. Zhang, L. When Unseen Domain Generalization is Unnecessary? Rethinking Data Augmentation / L. Zhang, X. Wang, D. Yang [et al.]. – 2019.
318. Zhang, N. Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics / N. Zhang, Y. Bai, X. Ding, Y. Zhang // Dental Materials Journal. – 2011. – Vol. 30. – № 6.
319. Zheng, Q. Deep Learning for Robust Segmentation and Explainable Analysis of 3D and Dynamic Cardiac Images To cite this version : HAL Id : tel-02083415 PhD of Science Deep Learning for Robust Segmentation and Explainable Analysis of 3D and Dynamic Cardiac Images / Q. Zheng. – 2019.
320. Zheng, Q. 3-D Consistent and Robust Segmentation of Cardiac Images by Deep Learning With Spatial Propagation / Q. Zheng, H. Delingette, N. Duchateau, N. Ayache // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2018. – Vol. 37. – № 9.
321. Zhou, X. Three-dimensional CT image segmentation by combining 2D fully convolutional network with 3D majority voting / X. Zhou, T. Ito, R. Takayama [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – Vol. 10008 LNCS. – P. 111-120.
322. Zhou, X. Deep learning of the sectional appearances of 3D CT images for anatomical structure segmentation based on an FCN voting method / X. Zhou, R. Takayama, S. Wang [et al.] // Medical Physics. – 2017. – Vol. 44. – № 10.

323. Zhou, X. Y. Normalization in training U-Net for 2-D biomedical semantic segmentation / X. Y. Zhou, G. Z. Yang // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4. – № 2.

324. Zhu, Y. Force changes associated with differential activation of en-masse retraction and/or intrusion with clear aligners / Y. Zhu, W. Hu, S. Li // Korean Journal of Orthodontics. – 2021. – Vol. 51. – № 1.

325. Zon, M. van. Automatic cardiac landmark localization by a recurrent neural network / M. van Zon, M. Veta, S. Li. – 2019.

326. Zotti, C. GridNet with automatic shape prior registration for automatic MRI cardiac segmentation / C. Zotti, Z. Luo, O. Humbert [et al.] // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – Vol. 10663 LNCS.

327. Zotti, C. Convolutional Neural Network with Shape Prior Applied to Cardiac MRI Segmentation / C. Zotti, Z. Luo, A. Lalande, P. M. Jodoin // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. – 2019. – Vol. 23. – № 3.

328. Zweers, J. Characteristics of periodontal biotype, its dimensions, associations and prevalence -a systematic review- / J. Zweers, R. Z. Thomas, D. E. Slot, A. S. Weisgold. – 2014.