

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИКО-СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ А.И. ЕВДОКИМОВА»
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

Ничипор Евгения Александровна

**ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОФОКУСНОЙ КОНУСНО-ЛУЧЕВОЙ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ
СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИНОРОДНЫХ
ОБЪЕКТОВ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)**

14.01.13 – Лучевая диагностика, лучевая терапия (медицинские науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, доцент

Петровская Виктория Васильевна

Научный консультант:

доктор медицинских наук, доцент

Алпатова Виктория Георгиевна

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ВОЗМОЖНОСТЯХ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	17
1.1. Применение мультисрезовой и конусно-лучевой компьютерных томографий в стоматологии	17
1.2. Особенности методики и применение микрофокусной рентгенографии в медицине	22
1.3. Особенности методики и применение микроКЛКТ в медицине	26
1.4. Применение микрофокусной рентгенографии и микроКЛКТ в стоматологии	29
ГЛАВА 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1. Характеристика препаратов удаленных зубов на этапе сортировки	35
2.2. Обследование корней препаратов удаленных зубов до эндодонтического лечения	36
2.3. Обследование корней препаратов удаленных зубов после эндодонтического лечения	37
2.4. Характеристика препаратов нижних челюстей	42
2.5. Методы лучевого исследования препаратов зубов и челюстей	44
2.6. Статистическая обработка результатов исследования	49
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	51
3.1. Исследование корней препаратов удаленных зубов до лечения	51
3.1.1. Дополнительные корневые каналы в апикальной части корней зубов, заканчивающиеся апикальными отверстиями	51
3.1.2. Корни, в апикальной части которых каналы разделялись на	

несколько близких по диаметру каналов	54
3.1.3. Дополнительные корневые каналы с отверстиями на поверхности корня не в апикальной части зуба	55
3.1.4 Анастомозы между продольно направленными корневыми каналами	57
3.1.5. Содержимое в полости корневых каналов	60
3.1.6. Линии перелома корней зубов	63
3.2. Рентгенологическая характеристика структуры эндодонтических материалов и металлических объектов в корневых каналах препаратов удаленных зубов после лечения	67
3.2.1. Кальций-алюмосиликатный цемент	67
3.2.2. Стандартные гуттаперчевые штифты для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи в сочетании с цинкоксидэвгенольным силером	72
3.2.3. Термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы	75
3.2.4. Фрагменты металлических инструментов в корневых каналах	80
3.3. Результаты исследования препаратов нижней челюсти	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
ВЫВОДЫ	116
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВНЧС – височно-нижнечелюстной сустав

ЗЧС – зубочелюстная система

КЛКТ – конусно-лучевая компьютерная томография

МикроКЛКТ – микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография

МСКТ – мультисрезовая компьютерная томография

ЧЛО – челюстно-лицевая область

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Высокое качество лучевой диагностики – одно из условий успешного исхода медицинских вмешательств в области зубочелюстной системы (ЗЧС). Учитывая сложное строение этой области, а также изменчивость вариантов нормальной анатомии, большое значение имеет высокая информативность исследования. Для рентгенологической оценки состояния структур ЗЧС применяются методики традиционной рентгенографии и компьютерной томографии (Чибицова М. А. и др., 2020; Трутьев В. П., 2020).

Для традиционной рентгенографии характерны геометрические и суммационные искажения, которые возникают в ходе формирования проекционных двумерных изображений трехмерного объекта (Лежнев Д. А. и др., 2019). Использование микрофокусных рентгеновских трубок позволяет получить более резкое, контрастное, увеличенное псевдообъемное изображение в сочетании со сниженной радиационной нагрузкой, но искажения и суммация не исключаются (Клестова И. А. и др., 2016).

Мультисрезовая компьютерная томография (МСКТ) и конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) предназначены для сканирования области заданного объема с последующим построением реконструкций, которые не содержат суммации и искажений, типичных для двумерных рентгенологических методик. По результатам МСКТ и КЛКТ могут быть получены мультипланарные реконструкции в произвольной плоскости или построены трехмерные модели изучаемых объектов. При работе с реконструкциями в зависимости от программного обеспечения доступны различные инструменты для измерений и модификации изображения (Михальченко А. В. и др., 2018; Лежнев Д. А. и др., 2019; Patel S. et al., 2019). МСКТ и КЛКТ применяются в ходе диагностики патологии ЗЧС различной этиологии, планирования и контроля эндодонтического лечения, хирургических и реконструктивных вмешательств в челюстно-лицевой области (Петровская В. В., 2016; Долгалев А. А. и др., 2017; Лежнев Д. А. и др.,

2017; Bohner L. O. L. et al., 2017; Qiao X. et al., 2018; Patel S. et al., 2019). Сравнение информативности МСКТ и КЛКТ в исследовании костей черепа и мягких тканей головы не дает однозначных результатов и зависит от модели аппарата, параметров сканирования и реконструкции, а также от объекта и целей исследования (Лежнев Д. А. и др., 2017; Nardi C. et al., 2017; Saati S. et al., 2017; Лежнев Д. А. и др., 2019; da Silva Moura W. et al., 2019). Значимым фактором при выборе между двумя методиками компьютерной томографии является лучевая нагрузка на пациента. КЛКТ имеет преимущество за счет более низкой лучевой нагрузки (Nardi C. et al., 2017; Xie X. et al., 2018). На информативность исследования значимо влияют характерные для методик рентгеновской компьютерной томографии выраженные артефакты, возникающие на изображениях в присутствии инородных тел высокой плотности (Candemil A. P. et al., 2018; Demirturk Kocasarac H. et al., 2019).

Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография (микроКЛКТ) – разновидность КЛКТ, в которой применяется источник рентгеновского излучения с фокусным пятном размером менее 100 мкм. Иными словами, эта методика совмещает преимущества микрофокусной рентгеновской съемки и технологии КЛКТ. Поэтому микроКЛКТ позволяет получать мультипланарные и трехмерные реконструкции в сочетании с высоким пространственным разрешением (Староверов Н. Е., Грязнов А. Ю., Потрахов Н. Н., 2018). Современные аппараты микроКЛКТ не предназначены для применения в клинической медицине. При их использовании доступно только длительное по времени сканирование неподвижных объектов ограниченного объема, поэтому микроКЛКТ применяется только в экспериментальных исследованиях (Hutchinson J. C. et al., 2017; Ободовский А. В., 2018). Методика микроКЛКТ использовалась в ограниченном количестве публикаций в медицине, в частности, стоматологии. Интерес к микроКЛКТ в этих областях науки постепенно растет, но большинство исследований с применением микроКЛКТ носит пробный «пилотный» характер, отсутствуют алгоритмы работы, часто анализ производится на основании небольшого числа сканирований (Hutchinson J. C. et al., 2017; de Sousa-Neto M. D.

et al., 2018; Aksoy U. et al., 2021). В России за последние 5 лет было опубликовано всего несколько десятков научных работ, посвященных применению микроКЛКТ в медицине, в частности, стоматологии, так как только немногочисленные коллективы авторов использовали микроКЛКТ в своих научных исследованиях (Овчаренко Е. А. и др. 2017; Доменюк Д. А. и др., 2019; Клышников К. Ю. и др., 2018, 2019; Васильев А. Ю., Ничипор Е. А. и др., 2020).

Таким образом, современные методики лучевого обследования не лишены недостатков, которые приводят к снижению информативности исследования. Есть потребность в разработке и внедрении более совершенных методик лучевой диагностики. Анализ существующих на сегодняшний день научных публикаций дает основания ожидать, что микроКЛКТ – новая перспективная технология рентгенологического исследования в стоматологии.

Степень разработанности проблемы

При помощи микроКЛКТ ряд ученых визуализировали структуру костной ткани (de Faria Vasconcelos K. et al., 2016; Irie M. S. et al., 2018; Ничипор Е. А. и др., 2019; Liu, X. et al., 2021) и изучали естественные и патологические процессы изменения минерализации зубов (Левицкая А. Д. и др., 2018; Доменюк Д. А. и др., 2019). Методика микроКЛКТ позволила наблюдать строение микроскопических корневых каналов (Wolf T. et al., 2017; Ничипор Е. А., Петровская В. В. и др., 2020). Проводились исследования по обнаружению переломов корней зубов на микроКЛКТ-томограммах (Baugram H. M. et al., 2017; De-Deus G. et al., 2019). По результатам микроКЛКТ анализировали последствия применения различных инструментов и алгоритмов в ходе эндодонтического лечения (Митронин А. В. и др., 2018; de Sousa-Neto M. D. et al., 2018) и определяли свойства пломбировочных материалов в корневых каналах зубов после лечения (Torres F. F. E. et al., 2018; Петровская В. В. и др., 2019; Васильев А. Ю., Ничипор Е. А. и др., 2021). МикроКЛКТ применялась для поиска и анализа положения сломанных металлических инструментов в корневых каналах удаленных зубов (Meng Y. et al., 2020; Ничипор Е. А., Петровская В. В. и др., 2021). Во всех этих исследованиях

отмечалась высокая информативность микроКЛКТ и перспективность ее применения в стоматологии в качестве неразрушающей методики исследования, которая позволяет изучать трехмерное внутреннее строение микроскопических объектов без вмешательства в их структуру.

При изучении отечественной и зарубежной научной литературы выявляется закономерность, согласно которой интерес к микроКЛКТ в медицине, в частности, в стоматологии, возрос в течение последних 5–10 лет, но при этом возможности методики на сегодняшний день остаются малоизученными. В существующих публикациях не проводилась всесторонняя оценка высокоплотных инородных материалов в области ЗЧС по данным микроКЛКТ в сравнении с методиками КЛКТ и МСКТ. Не установлены рентгеносемиотические признаки многих эндодонтических материалов по данным микроКЛКТ. Не определены перспективы для дальнейшего внедрения этой методики лучевого исследования в экспериментальную и клиническую работу. В отечественной медицине специалисты мало информированы о возможностях микроКЛКТ.

Цель исследования

Совершенствование лучевой диагностики костных структур и высокоплотных инородных материалов в области зубочелюстной системы за счет сравнительного анализа информативности исследований с использованием мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ информативности экспериментального исследования препаратов челюстей при использовании мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий.

2. Провести сравнительный анализ информативности экспериментального исследования удаленных зубов до и после эндодонтического

лечения при использовании мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий.

3. Установить рентгеносемиотические признаки пломбировочных материалов, использованных при эндодонтическом лечении, по результатам проведенных исследований компьютерных томографий.

4. Оценить влияние инородных высокоплотных материалов на информативность полученных диагностических изображений.

Научная новизна исследования

Диссертационное исследование является первым в России научным трудом, посвященным всестороннему анализу возможностей микроКЛКТ в сравнении с КЛКТ и МСКТ при исследовании препаратов нижней челюсти и удаленных зубов до и после эндодонтического лечения, а также в присутствии металлических объектов.

На основании результатов диссертационного исследования зарегистрирована база данных изображений микроКЛКТ корней удаленных зубов, каналы которых содержат пломбировочные материалы и фрагменты преднамеренно сломанных инструментов для эндодонтического лечения (свидетельство о регистрации базы данных 2021620403 от 04.03.2021).

Впервые проведены сравнительный анализ мультипланарных реконструкций по данным экспериментального исследования удаленных зубов при использовании МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ и сравнительная оценка количества и особенностей конфигурации каналов корней удаленных зубов, наличия содержимого в корневых каналах, а также для обнаружения линий перелома корней удаленных зубов.

Впервые описаны рентгеносемиотические признаки различных пломбировочных материалов по данным КЛКТ и микроКЛКТ.

Впервые проведен анализ информативности КЛКТ и микроКЛКТ при изучении металлических объектов в корневых каналах удаленных зубов, в том числе в присутствии различных пломбировочных материалов.

Впервые осуществлен сравнительный анализ исследований МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ при изучении структуры костной ткани и анатомических ориентиров нижней челюсти, в том числе в присутствии металлических конструкций.

Впервые произведена сравнительная оценка информативности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ в присутствии высокоплотных инородных материалов, таких, как эндодонтические материалы, металлические ортопедические конструкции и фрагменты сломанных металлических инструментов в области ЗЧС.

Теоретическая и практическая значимость работы

В ходе диссертационной работы разработана методология сканирования и анализа результатов микроКЛКТ удаленных зубов и препаратов нижней челюсти, в том числе в присутствии высокоплотных эндодонтических материалов и металлических объектов.

Результаты микроКЛКТ корней зубов в присутствии инородных материалов были зарегистрированы в виде базы двухмерных изображений.

По данным сравнительного анализа данных сканирования препаратов ЗЧС при помощи МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ были сделаны выводы о диагностических возможностях использованных методик компьютерной томографии. Результаты исследования показывают преимущества КЛКТ по сравнению с МСКТ, и микроКЛКТ по сравнению с МСКТ и КЛКТ в исследовании препаратов челюстей и удаленных зубов.

По информации микроКЛКТ получены уникальные рентгеносемиотические признаки нескольких пломбировочных материалов, использованных в исследовании. Предложено уникальное описание рентгенологической картины этих материалов на микроскопическом уровне.

Выполнен сравнительный анализ влияния высокоплотных пломбировочных материалов на информативность КЛКТ-томограмм и микроКЛКТ-томограмм. Изучены результаты КЛКТ и микроКЛКТ в исследовании фрагментов сломанных металлических инструментов в корневых каналах зубов в присутствии пломбировочных материалов и без них. Проведена оценка влияния крупных

металлических конструкций на визуализацию кости нижней челюсти по данным микроКЛКТ и КЛКТ. В результате была доказана более высокая информативность микроКЛКТ при исследовании области ЗЧС с высокоплотными инородными элементами.

Учитывая выводы сравнительного анализа для КЛКТ и МСКТ предложены рекомендации по оптимизации лучевого исследования ЗЧС в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии и обоснован выбор микроКЛКТ в качестве предпочтительной методики для экспериментальных исследований ЗЧС, в том числе в присутствии высокоплотных инородных материалов.

Материалы и методы исследования

Диссертационное исследование было выполнено в несколько этапов.

На этапе библиографического исследования изучены зарубежные и отечественные публикации, посвященные изучаемой проблеме. Всего по теме диссертации было выделено 169 публикаций, из них 60 зарубежных и 109 отечественных.

На первом этапе экспериментальной работы выполнялись МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ 4 препаратов нижней челюсти, а также 76 удаленных зубов, которые имели 136 корней.

На втором этапе эксперимента корни 71 удаленного зуба были пролечены эндодонтически с применением нескольких пломбировочных материалов. У 13 зубов были пролечены не все корни, поэтому всего было пролечено 109 корней. После эндодонтической обработки пролеченные корни можно было разделить на группы в зависимости от содержимого корневых каналов:

- а) фрагменты преднамеренно сломанных стальных и никель-титановых инструментов для эндодонтического лечения (26 корней);
- б) кальций-алюмосиликатный цемент (20 корней);
- в) фрагменты металлических инструментов и кальций-алюмосиликатный цемент (9 корней);

г) стандартная гуттаперча для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи и цинкоксидэвгенольный силер (30 корней);

д) гуттаперчевые штифты для латеральной конденсации холодной гуттаперчи, цинкоксидэвгенольный силер и фрагменты металлических инструментов (10 корней);

е) термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы (8 корней);

ж) термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе без силера (6 корней).

После обработки каждый зуб был исследован при помощи КЛКТ и микроКЛКТ.

В исследовании применялись мультисрезовый компьютерный томограф Philips Brilliance 64 (Philips, США), конусно-лучевой компьютерный томограф Kavo OP 3D Vision (Imaging Sciences International LLC, США) и микрофокусный конусно-лучевой компьютерный томограф МРКТ-04 (кафедра ЭПУ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия).

По результатам сканирований построены двухмерные и трехмерные реконструкции при помощи программного обеспечения Radiant, iCatVision и 3D Slicer. В ходе анализа проводились обработка полученных данных с использованием современных методов статистического анализа и обобщение результатов работы с формированием заключения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. МикроКЛКТ более информативна по сравнению с МСКТ и КЛКТ в экспериментальном исследовании препаратов челюстей, в том числе в присутствии металлических объектов.

2. МикроКЛКТ более информативна по сравнению с МСКТ и КЛКТ в экспериментальном исследовании корней препаратов удаленных зубов до и после

эндодонтического лечения, а также сломанных металлических инструментов в корневых каналах.

3. Различные эндодонтические материалы обладают уникальными рентгеносемиотическими особенностями. Данные рентгенологические характеристики выявляются только на изображениях, полученных с использованием микроКЛКТ.

4. Артефакты от инородных веществ высокой плотности, таких, как металл и пломбировочные материалы, ослабляются на изображениях микроКЛКТ.

Связь работы с научными программами, планами

Диссертационная работа была выполнена в соответствии с научно-исследовательской программой кафедры лучевой диагностики стоматологического факультета ФГБОУ ВО МГМСУ им. А. И. Евдокимова Минздрава России «Разработка и оптимизация современных лучевых диагностических технологий для решения задач клинической практики» (государственная регистрация № АААА-А20-120012890148-0). Тема диссертационного исследования рекомендована к выполнению и утверждена на заседании ученого совета ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России (протокол № 8 от 9 апреля 2019 г.). Клинические исследования в рамках диссертационной работы одобрены этическим комитетом ФГБОУ ВО МГМСУ им. А. И. Евдокимова Минздрава России (протокол № 03-19 межвузовского комитета по этике от 21.03.2019 г.).

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности

Цель, задачи, методы и методики, а также результаты диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности 14.01.13 – «Лучевая диагностика, лучевая терапия».

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Автором проведен анализ научной литературы по теме диссертационного исследования с использованием зарубежных и российских источников. Автор принимала участие в формулировке темы, цели и задач диссертационного исследования и в разработке дизайна исследования. Автор лично вела организацию и контроль подготовки материалов исследования в ходе эндодонтического лечения 71 препарата удаленных зубов. Автором проведено 21 сканирование МСКТ и 151 сканирование КЛКТ препаратов челюстей и удаленных зубов до и после лечения. Автором проведен сравнительный анализ результатов 21 МСКТ, 151 КЛКТ и 151 микроКЛКТ сканирований препаратов нижней челюсти и удаленных зубов до и после эндодонтического лечения. В ходе анализа автором построены и изучены двухмерные и трехмерные компьютерные реконструкции каждого из препаратов, зарегистрирована база данных изображений препаратов зубов после эндодонтического лечения по данным микроКЛКТ. Автором подготовлены текст и иллюстрации для докладов и изданных по теме диссертационной работы публикаций.

Достоверность результатов исследования

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается числом проанализированных исследований, проведенных с использованием современных методик лучевого исследования: МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ. Данные сканирований пролеченных препаратов зубов с помощью микроКЛКТ зарегистрированы в виде базы двухмерных изображений. Результаты диссертационной работы опубликованы в форме статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих базы публикаций Scopus и Web of Science. Тезисы и доклады по данным диссертационного исследования были представлены и обсуждены на конгрессах и конференциях международного, всероссийского и межрегионального уровней. Выводы и рекомендации основаны на результатах исследования, которые изложены в диссертационной работе и сопровождаются таблицами и рисунками. Интерпретация данных осуществлялась с использованием

современных методов обработки информации при помощи пакета статистических прикладных программ SPSS 16.0. При оценке достоверности заключений применялись статистические критерии для анализа непараметрических данных, которые подтвердили значимость обнаруженных различий в информативности методик компьютерной томографии.

Апробация результатов диссертационного исследования

Диссертационная работа апробирована и рекомендована к защите на заседании кафедры лучевой диагностики стоматологического факультета ФГБОУ ВО МГМСУ им. А. И. Евдокимова Минздрава России (протокол № 214 от 24.05.2021).

Обсуждение основных положений диссертационной работы

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на всероссийских, межрегиональных и международных конгрессах и конференциях:

1. XII Международный конгресс «Невский радиологический форум-2021», онлайн (Санкт-Петербург, 7–10 апреля 2021 г.).
2. VII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники, онлайн (Санкт-Петербург, 26–27 ноября 2020 г.).
3. IV Межрегиональная научно-практическая online-конференция с международным участием «Лучевая диагностика – Смоленск 2020: конкурс молодых ученых», постерный доклад (Смоленск, 25–25 сентября 2020 г.).
4. Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов 2020, онлайн (Москва, 9–11 ноября 2020 г.).
5. VI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 28–29 ноября 2019 г.).
6. Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием «Лучевая диагностика: конкурс молодых радиологов» (Смоленск, 27 сентября 2019 г.).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены: в учебный процесс на кафедре лучевой диагностики с/ф ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России на этапе дополнительного профессионального образования по специальности «Рентгенология»; в учебный процесс на кафедре ЭПУ ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) при подготовке курсов лекций для бакалавров и магистров по направлению подготовки «Биомедицинская инженерия»; в учебный процесс ООО «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики» на этапе дополнительного профессионального образования; в клиническую практику отделения рентгеновской и лучевой диагностики «Клинического центра челюстно-лицевой, пластической хирургии и стоматологии» клиники МГМСУ им. А. И. Евдокимова.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы изложены в 18 публикациях. Из них 5 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, и 1 публикация в базе данных Web of Science. Получен патент на базу данных мультипланарных реконструкций по данным микроКЛКТ удаленных зубов, пролеченных эндодонтически (№ 2021620403 от 04.03.2021).

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста, состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, практических рекомендаций и списка литературы, который включает 109 отечественных и 60 иностранных источников, содержит 11 таблиц и 51 рисунок. Диссертация оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ВОЗМОЖНОСТЯХ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Сложное трехмерное строение костей лицевого черепа и мелкие размеры многих анатомических структур в области ЗЧС обуславливают потребность в методиках рентгенологической диагностики, способных оценить строение высокоплотных объектов небольшого размера. С этой целью в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии применяется ряд методик традиционной рентгенографии и компьютерной томографии [54, 147].

1.1. Применение мультисрезовой и конусно-лучевой компьютерных томографий в стоматологии

Традиционная рентгенография в стоматологии представлена различными методиками прицельной, обзорной и панорамной съемок челюстно-лицевой области [4, 103, 104]. Двухмерные рентгеновские изображения, полученные в результате применения этих методик, характеризуются геометрическими и суммационными искажениями, не дают возможности наблюдать трехмерную структуру объектов исследования [25, 54, 60].

МСКТ и КЛКТ позволяют избежать искажений, свойственных методикам двухмерной рентгенографии, и предоставляют возможность для мультипланарной реконструкции и трехмерного моделирования [25, 54, 60, 147]. Показатели диагностической эффективности (чувствительность, специфичность, точность) у методик трехмерной компьютерной томографии выше, чем у двухмерной традиционной рентгенографии. Применение КЛКТ вместо рентгенографии при планировании эндодонтического лечения приводит к статистически значимому повышению количества благоприятных исходов лечения и снижению количества таких осложнений, как периодонтит, перелом корня, поломка инструмента внутри канала, выведение материала в верхнечелюстной синус [74, 75, 103, 104]. В то же

время для методик трехмерной компьютерной томографии характерны артефакты от объектов высокой плотности. Они могут значительно снижать информативность исследования, так как при изучении миниатюрных структур ЗЧС даже умеренные артефакты влияют на результаты. Для КЛКТ свойственны менее выраженные артефакты от плотных объектов по сравнению с МСКТ [22, 44, 115, 128]. По мнению некоторых авторов, программные и аппаратные средства МСКТ и КЛКТ в ослаблении артефактов от плотных объектов достигли оптимальной степени развития, а в ряде клинических ситуаций не дают значимого повышения информативности. Для раскрытия новых возможностей в области подавления артефактов от высокоплотных объектов перспективно ввести в использование новую методику исследования [118, 123, 128].

При выборе алгоритма лучевого обследования в клинической практике значимым фактором является соотношение эффективности методики при решении поставленных задач и лучевой нагрузки на пациента. Отношение информативности к лучевой нагрузке МСКТ и КЛКТ при сканировании ЗЧС зависит от модели аппарата, параметров сканирования и реконструкции, целей исследования, особенностей каждой конкретной клинической ситуации. В большинстве ситуаций при сопоставимой информативности исследования структур ЗЧС лучевая нагрузка при МСКТ выше, чем при КЛКТ [54, 87, 124, 141, 143, 162, 165]. Это один из основных факторов, который обуславливает более широкое по сравнению с МСКТ распространение КЛКТ в современной стоматологии и челюстно-лицевой хирургии.

КЛКТ широко применяется в ретроспективных исследованиях корневых каналов зубов, в которых изучаются архивы клинических наблюдений. Результаты КЛКТ используются для сбора статистической информации о строении корневых каналов зубов определенной локализации у пациентов в зависимости от возраста, этнической принадлежности и других факторов. Эту информацию предлагается использовать для планирования тактики эндодонтического лечения с учетом наиболее распространенных вариантов анатомии корневых каналов [76, 101, 106, 146, 147]. Отдельные исследования корневых каналов проводятся

экспериментально на препаратах удаленных зубов, что позволяет подтвердить результаты КЛКТ в ходе последующей микроскопии распилов зубов [4].

При помощи как МСКТ, так и КЛКТ можно получить детализированную картину структуры костной ткани и наблюдать основные анатомические ориентиры ЗЧС [54, 152]. Как показали исследования комплексной диагностики остеонекрозов, показатели диагностической эффективности КЛКТ и МСКТ при изучении изменений структуры костной ткани сопоставимы между собой и выше, чем у методик двухмерной рентгенологической диагностики [92]. КЛКТ часто применяется в диагностике очаговой деструкции костной ткани [26, 60, 90].

Доказана сопоставимая информативность МСКТ и КЛКТ в диагностике травматических изменений структуры кости [53]. Определение повреждений корней зубов, таких, как продольные линии перелома, по результатам КЛКТ бывает затруднено и часто производится по косвенным признакам, но превосходит в эффективности двухмерные снимки [72, 147]. В эксперименте подтверждено, что диагностическая эффективность КЛКТ в обнаружении продольных переломов корней зубов также выше, чем у МСКТ [113].

КЛКТ эффективно применяется в оценке состояния околоносовых пазух черепа и превосходит в этой области методики традиционной рентгенографии. Хорошо определяются пневматизация, содержимое, целостность стенок, факторы риска возникновения синуситов [109, 160]. Диагностическая информативность МСКТ и КЛКТ при оценке костных структур пазух сопоставима [93].

Структуры низкой плотности, такие, как мягкие ткани или грибковые тела, на изображениях КЛКТ дифференцируются хуже по сравнению с МСКТ [53, 54, 61, 92, 109, 160]. Поэтому при выборе из двух методик следует учитывать их эффективность в зависимости от ситуации. Например, при подозрении на одонтогенные костно-деструктивные изменения без вовлечения мягких тканей рекомендуется отдавать предпочтение КЛКТ [109]. При наблюдении новообразований различного происхождения МСКТ дает возможность оценить инвазию в мягкие ткани, тогда как применение КЛКТ оптимально в случаях, когда интересуют только костно-деструктивные процессы [92, 149]. В зависимости от

задач при визуализации структур ВНЧС можно использовать МСКТ в качестве альтернативы более дорогостоящему и длительному сканированию с применением магнитно-резонансной томографии [43]. При работе с контрастированием, по мнению некоторых авторов, следует отдавать предпочтение КЛКТ в связи с достаточной информативностью, пониженной лучевой нагрузкой и физиологичным сидячим положением пациента во время исследования [91].

Большое количество работ посвящено всестороннему изучению эндодонтического лечения на всех этапах под контролем КЛКТ. При помощи КЛКТ изучаются результаты применения различных эндодонтических материалов: оценивается непрерывность и равномерность заполнения корневых каналов, толщина периодонтальной щели, состояние тканей в периапикальной области [21, 147]. КЛКТ не позволяет оценить структуру эндодонтических материалов, наблюдаются только отличия в рентгеноконтрастности, в зависимости от которой запломбированные каналы в разной степени вызывают артефакты при сканировании пролеченных зубов. Отмечается, что на КЛКТ-томограммах эндодонтические материалы обладают более высокой рентгеноконтрастностью, чем на двухмерных дентальных рентгенограммах [88]. В отдельных исследованиях предлагаются новые алгоритмы эндодонтического лечения с применением возможностей КЛКТ. Например, было предложено использовать данные КЛКТ для трехмерного моделирования и изготовления индивидуальных эндодонтических шаблонов, которые предназначены направлять и контролировать процесс лечения [97]. При поломке инструментов внутри каналов в ходе эндодонтического лечения КЛКТ используется для определения положения отломка в корневом канале, визуализации строения канала и объема сохранившегося дентина, оценки последствий операции по извлечению инструмента из канала [96, 107].

КЛКТ позволяет контролировать установку имплантатов вблизи важных анатомических образований у пациентов с дефицитом костной ткани. Можно проводить измерения расстояния, объема и плотности кости. Доступно программное обеспечение для моделирования виртуальной имплантации с целью оценки рисков. Использование КЛКТ на этапе планирования вмешательства

способствует уменьшению травматизации в процессе имплантации, снижает риск осложнений [16, 52, 62]. Сравнение КЛКТ-томограмм и гистологического исследования биоптатов костной ткани нижней челюсти демонстрирует, что данные КЛКТ коррелируют с процессами костного ремоделирования до имплантации и позволяют прогнозировать процессы остеоинтеграции и отдаленные результаты операционного вмешательства [48].

КЛКТ применяется на всех этапах хирургического лечения пациентов с деформациями ЧЛЮ. При оценке симметричности и взаимного расположения костей в ходе коррекции аномалий используются возможности методик компьютерной томографии по построению мультипланарных реконструкций и трехмерных моделей лицевого скелета. Выбирая методику компьютерной томографии для данных задач, особенно важно учитывать более низкую лучевую нагрузку при КЛКТ в сравнении с МСКТ, так как большинство пациентов с аномалиями проходят лечение в детском и молодом возрасте [49, 79, 93].

КЛКТ является ценным инструментом как в прижизненных, так и в экспериментальных краниометрических и краниоморфологических исследованиях. При помощи КЛКТ было получено много новой информации о вариантах нормального строения черепа, а программное обеспечение позволяет оценивать трехмерные данные, реконструкции в различных плоскостях, и получать количественные антропометрические измерения [23, 24, 29, 31, 33]. В ортопедии сравнение данных КЛКТ о строении височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) пациента с результатами антропометрических исследований может быть использовано для определения факторов риска возникновения дисфункции сустава. Рекомендуется учитывать тип лица пациента и результаты КЛКТ ВНЧС перед началом ортодонтического лечения для достижения лучших результатов [38]. Перед протезированием зубного ряда компьютерная томография ВНЧС рекомендована для того, чтобы определить наличие дисфункции суставов [108].

В ходе кохлеарной имплантации методики компьютерной томографии используются для контроля положения электродной решетки, причем, по данным некоторых исследований, КЛКТ предпочтительнее МСКТ за счет более низкой

лучевой нагрузки, более высокого пространственного разрешения и менее выраженных артефактов от металла [22, 44].

Таким образом, МСКТ и КЛКТ всесторонне применяются в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Выбор вида компьютерной томографии следует делать с учетом доступности и возможностей методики. Авторы многих работ отмечают, что соотношение информативности и лучевой нагрузки при использовании современных аппаратов КЛКТ делают данную методику приоритетной во многих ситуациях по сравнению с традиционной рентгенографией и МСКТ. В зависимости от жалоб пациента и предполагаемой тактики последующего лечения КЛКТ может быть рекомендована как методика первичного обследования. Требуется оптимизация алгоритмов лучевого обследования, расширение показаний к назначению КЛКТ, в том числе при первичном обследовании, с учетом возможностей современных аппаратов [54, 60, 87, 90, 141, 147, 162].

1.2. Особенности методики и применение микрофокусной рентгенографии в медицине

В современной медицинской рентгеновской диагностике чаще всего используются аппараты, в которых в качестве источника излучения установлена рентгеновская трубка с фокусным пятном размером от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. В микрофокусной съемке применяются рентгеновские трубки с размером фокусного пятна менее 100 микрометров. Согласно ГОСТ 20337-74, такие источники рентгеновского излучения принято называть микрофокусными. Точечный характер фокусного пятна рентгеновской трубки обуславливает ряд уникальных свойств микрофокусной рентгеновской съемки [8, 73, 84, 85].

Эффект увеличения глубины резкости заключается в способности микрофокусной рентгеновской съемки получать многократно увеличенные изображения без потери резкости. Геометрия формирования двухмерного рентгеновского изображения такова, что при размере фокусного пятна, отличного

от точечного, возникает геометрическая нерезкость. По этой причине при съемке из источника рентгеновского излучения макроскопических размеров требуется располагать объект исследования максимально близко к приемнику излучения, что снижает геометрическую нерезкость [8, 84, 85]. За счет приближения размеров источника излучения к точечным геометрия распространения рентгеновских лучей изменяется таким образом, что геометрическая нерезкость становится незначительной. Объект исследования можно размещать близко к источнику излучения, что приводит к формированию увеличенного изображения без потери четкости [8, 84, 85].

Многokратное проекционное увеличение мелких структур облегчает их обнаружение и визуальную оценку. Проекционное увеличение мелких деталей без потери четкости повышает чувствительность цифровых приемников рентгеновского изображения за счет регистрации дополнительных структур. В таких условиях допустимо применение цифровых детекторов с меньшей разрешающей способностью для получения детальных снимков. Кроме отсутствия геометрической нерезкости, информативность микрофокусного изображения также повышена за счет эффекта «воздушной подушки» при удалении объекта исследования от приемника рентгеновского излучения. Становится допустимо снижение экспозиционной дозы при использовании микрофокусной рентгеновской трубки низкой мощности без потери качества изображения [7, 8, 19, 73, 84, 85].

Микрофокусные рентгеновские изображения способны имитировать картину линейной перспективы, которую воспринимают глаза человека при виде реальных трехмерных пространств и объектов. В зависимости от расстояний между источником излучения, объектом и приемником рентгеновского излучения, микрофокусная рентгеновская съемка позволяет получить псевдообъемный эффект на двухмерном изображении [8, 41, 85]. При изучении двухмерного рентгеновского снимка трехмерного объекта на псевдообъемных изображениях снижается негативное влияние суммационного эффекта, так как изменяется положение контуров структур относительно друг друга [41, 56]. На микрофокусных рентгенограммах мелких и сложно устроенных объектов, таких, как препараты

зубов человека, очертания накладываются друг на друга меньше, чем при традиционной контактной съемке, появляется возможность судить об относительном расположении структур в пространстве по двумерному изображению [7].

Использование микроскопических источников излучения позволяет получить явление фазового контраста, который формируется в результате изменения направления потока излучения на границе раздела сред с разными показателями преломления. На изображениях возникает подчеркнутость границ между веществами разной плотности, что заметно не только при исследовании высокоплотных материалов, но и органических мягкотканых структур. При помощи фазового контраста может быть значительно облегчено обнаружение мелких деталей и повышена информативность рентгеновской диагностики мягких тканей [8, 20, 55].

Перечисленные выше особенности микрофокусной рентгенографии способствует повышению информативности исследования при уменьшении лучевой нагрузки в сравнении со съемкой с использованием протяженного источника рентгеновского излучения. Объект исследования можно размещать близко к источнику, что предоставляет большую свободу в позиционировании компонентов диагностической системы. Псевдообъемное увеличенное изображение характеризуется повышенной четкостью, контрастностью, высоким качеством визуализации мелких низкоплотных деталей [8, 41, 45, 73, 84, 102].

В ходе изучения научной литературы было обнаружено, что отечественные публикации на тему микрофокусной лучевой диагностики в медицине немногочисленны и сосредоточены в основном в области изучения костно-суставной системы, системы кровообращения и маммологии. Большинство из этих работ посвящены микрофокусной рентгенографии.

По данным российских исследований доказаны высокая чувствительность и точность микрофокусной рентгенографии с прямым увеличением изображения по сравнению с традиционной контактной рентгенографией в обнаружении патологических изменений костных структур. Микрофокусная рентгенография

рекомендована как более эффективная методика при динамическом наблюдении конфигурации и взаимного положения костных балок в ходе терапии у пациентов с деструктивными изменениями костно-суставной системы. Это было продемонстрировано на примере наблюдения пациентов с ревматоидным артритом на разных сроках течения [2, 3], а также с болезнью Осгуда-Шлаттера [39]. Микрофокусная рентгенография позволяла визуализировать костные трабекулы, не заметные при традиционной контактной рентгенографии по причине их мелкого размера. Изменения костной ткани, надкостницы и окружающих мягких тканей обнаруживались на микрофокусных изображениях задолго до того, когда они достаточно прогрессировали, чтобы выявляться при помощи контактной рентгенографии [2, 3, 39].

Фантомное маммографическое исследование с применением микрофокусной рентгенографии с прямым геометрическим увеличением изображения продемонстрировало повышение эффективности лучевой диагностики по сравнению с контактной рентгенографией с оптическим увеличением. Микрофокусная рентгенография с прямым многократным геометрическим увеличением может повысить эффективность ранней диагностики в маммологии, а также снизить лучевую нагрузку при маммографии [41, 42].

На примере экспериментального исследования препаратов печени в сочетании с препарированием и окрашиванием была показана потенциальная информативность микрофокусной рентгенографии с контрастированием для визуализации сосудов. Микрофокусная рентгенография применялась для визуализации характера артериопортальной перфузии, долевого строения печени и его корреляции с артериальным кровяным руслом, определения долевого строения печени по данным распространения перфузии [89, 105]. Наряду с препарированием и морфометрией микрофокусная рентгенография была эффективна в экспериментальном исследовании органокомплексов брюшной полости взрослых людей для определения вариантов строения анатомии сосудов системы воротной вены [15].

1.3. Особенности методики и применение микроКЛКТ в медицине

Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография сочетает технологию КЛКТ с использованием микрофокусной рентгеновской трубки. Пучок рентгеновских лучей имеет форму конуса, который охватывает весь объем исследуемого объекта, а в качестве проекций используются цифровые микрофокусные снимки с прямым геометрическим увеличением [6, 14, 19, 73, 132]. За счет этого появляется возможность совместить перечисленные выше преимущества микрофокусной рентгенографии и КЛКТ для получения контрастных, четких мультипланарных и трехмерных реконструкций с высоким пространственным разрешением даже в присутствии высокоплотных объектов.

Современные аппараты для микроКЛКТ не предназначены для работы в клинических условиях, так как они еще не приспособлены к позиционированию пациента в процессе исследования, объем зоны интереса ограничен, сканирования занимают много времени при высокой чувствительности к смещению изучаемого объекта и элементов томографа, отсутствует оптимизация лучевой нагрузки. Поэтому микроКЛКТ применяется исключительно для экспериментальных исследований *in vitro* или на мелких животных [6, 73, 122, 132].

На территории России ведутся передовые исследования по разработке микрофокусного оборудования, создан ряд микрофокусных диагностических установок, готовых к клиническому использованию, которые превосходят по многим параметрам зарубежные аналоги [85, 86, 98, 99]. Ведутся исследования по созданию и совершенствованию конкурентоспособных отечественных аппаратов для микроКЛКТ [6, 73].

МикроКЛКТ использовалась в единичных отечественных медицинских научных исследованиях. При оценке причин дисфункции и дегенеративных процессов эксплантированных ксеноперикардальных биопротезов сердечных клапанов у пациентов детского и взрослого возраста микроКЛКТ применялась при подсчете объема и распределения кальцификатов в биопротезе [17, 18]. Данные микроКЛКТ использовались для построения трехмерных моделей биопротезов сердечных клапанов и проведения количественной оценки их кальцификации [78].

С целью снижения риска послеоперационных осложнений был разработан и успешно испытан на практике алгоритм пациент-специфического виртуального моделирования процесса имплантации транскатетерного клапана аорты. МикроКЛКТ применялась для сканирования каркасов биопротезов с последующим построением высоко детализированных трехмерных реконструкций, которые использовались в компьютерном моделировании процесса имплантации [47, 77]. Реалистичная реконструкция атриовентрикулярного клапана сердца, полученная по данным сканирования микроКЛКТ, применялась для моделирования створчатого аппарата и течения жидкости через протезированный клапан в лабораторных условиях [46]. Большое значение в таких исследованиях имела высокая детализация трехмерной реконструкции по данным микроКЛКТ, обеспечившая максимальное приближение компьютерной модели к поведению реального объекта [46, 47].

Моделирование на животных с последующим изучением биоптатов при помощи микроКЛКТ проводилось отечественными специалистами в единичных случаях на примере исследования костной ткани после имплантации [57, 58].

В работах зарубежных авторов встречаются результаты микроКЛКТ в изучении более разнообразного ряда систем и органов организма человека на примере единичных исследований препаратов и образцов биопсии. Сочетание гистологического исследования и микроКЛКТ в изучении компонентов опухоли мозга позволило визуализировать процесс инвазии на клеточном уровне в трех измерениях [112]. В ходе удаления новообразований, таких, как рак молочной железы, микроКЛКТ предлагалось использовать для оценки резецированных тканей с целью определения достаточности объема резекции. Компьютерная томография оказалась предпочтительна гистологии, так как позволяла оценивать состояние всего объема удаленных тканей при меньшем количестве манипуляций [132, 140]. При совместном использовании гистологического и лучевого исследований микроКЛКТ позволяла устанавливать корреляцию плоскости гистологических срезов с исходным трехмерным объемом тканей [112].

Биопсию и микроКЛКТ предлагалось использовать при оценке состояния стенки кишечника. Сочетание этих методик позволяло сократить число ошибок в результате неудачного выбора области забора материала для микроскопии. Доступное при микроКЛКТ трехмерное моделирование мягких тканей послужило основой для нового диагностического критерия – площади поверхности компьютерной модели препарата слизистой оболочки стенки кишечника в зависимости от стадии болезни [161].

Визуализация трехмерной микроархитектуры легких, воздухоносных путей, количественный подсчет объема воздухоносных путей, поиск областей интереса для гистологии, морфометрический анализ рассматривались как возможные области для применения микрофокусной компьютерной томографии [116].

Оценка микроструктуры камней при нефролитиазе по данным микроКЛКТ биоптатов, взятых при нефролитотомии, проводилась в работах по изучению процессов формирования камней [117, 130].

МикроКЛКТ успешно использовалась в качестве альтернативы вскрытию и гистологическому исследованию на примере сканирования препаратов плода человека с целью изучения врожденных патологий [132].

В судебно-медицинской практике микроКЛКТ рассматривали как возможную альтернативу вскрытию, которая может раскрыть данные, недоступные при других видах исследования [132].

Одной из более перспективных областей для внедрения микроКЛКТ является исследование молочной железы, так как объем, плотность и форма области интереса позволяют приспособить микрофокусные аппараты для целей клинической работы. Это было доказано в ходе эксперимента по созданию макета микрофокусного конусно-лучевого компьютерного томографа для изучения молочной железы, который успешно прошел испытание с применением фантома. Высокое пространственное разрешение и хорошая дифференциация тканей низкой плотности определяют высокую информативность микроКЛКТ в маммологии [153].

Небольшое количество исследований с применением микроКЛКТ *in vivo* заключалось в моделировании изменений в организме человека на мелких животных. Однако чаще на животных проводятся исследования *ex vivo* с длительным временем сканирования [132].

На мелких животных проводятся исследования *in vivo* с использованием аппаратов, которые сочетают позитронно-эмиссионную томографию или однофотонную эмиссионную компьютерную томографию с микроКЛКТ. Гибридные установки PET/CT и SPECT/CT с микрофокусными рентгеновскими трубками для радионуклидного исследования и микроКЛКТ от ряда производителей применялись чаще всего в исследованиях, посвященных локализации, стадированию и терапии злокачественных новообразований. В таких аппаратах результаты радионуклидного исследования и микроКЛКТ могут рассматриваться как по отдельности, так и совмещаться при помощи специализированного программного обеспечения [120, 138].

1.4. Применение микрофокусной рентгенографии и микроКЛКТ в стоматологии

По данным экспериментальных и клинических исследований микрофокусная рентгенография высокоинформативна в визуализации корней зубов, трабекул кости челюстей, патологических изменений структуры костной ткани, аномалий строения, очаговых воспалительных процессов ЗЧС, костно-пластических и эндодонтических материалов, последствий хирургических вмешательств [14, 45, 79, 100, 129]. Цифровая микрофокусная рентгенография позволяет проводить интраоперационный и послеоперационный рентгенологический контроль в процессе хирургических вмешательств на костях черепа и ЗЧС, наблюдать прогресс остеорегенерации [95, 100]. Доказана эффективность панорамной микрофокусной рентгенографии в скрининговых исследованиях ЗЧС, предложен алгоритм скрининга [45]. Микрофокусная съемка дает возможность наблюдать детали строения, а также патологию зубочелюстной системы, не обнаруженные

при помощи контактной рентгеновской съемки и при клиническом обследовании пациентов, обладает низкой лучевой нагрузкой на пациента и персонал [7, 45, 56, 100].

На основании высокой информативности микрофокусной рентгенографии в стоматологии можно ожидать, что микроКЛКТ будет обладать высокой диагностической эффективностью. Современные микрофокусные компьютерные томографы не применяются в клинической практике. Тем не менее в последние годы микроКЛКТ приобретает все более значимую роль в экспериментальных исследованиях зубов [73, 111, 132].

МикроКЛКТ раскрыла новые диагностические возможности в таких направлениях эндодонтического лечения, как изучение строения системы корневых каналов и обнаружение апикальных отверстий [14, 110, 137, 163, 166, 167], оценка качества препарирования [94, 126, 135, 136, 159] и пломбирования [9, 59, 80, 82, 155] корневых каналов, эффективности удаления эндодонтического материала из каналов на этапах повторного лечения [111, 151], при визуализации таких негативных последствий лечебных манипуляций, как перфорации и микротрещины дентина зубов [114, 127, 169].

МикроКЛКТ применялась в экспериментальных исследованиях в сочетании с гистологическим исследованием и электронной микроскопией. Трехмерные и двухмерные реконструкции позволяли выбирать в биоптатах область для забора материала в ходе микроскопии, соотносить гистологические срезы с их положением в объеме исходного препарата. В зависимости от задач исследования некоторые авторы предлагают дополнить или заменить гистологический анализ и электронную микроскопию на микроКЛКТ [27, 133, 135, 154].

Неразрушающий характер исследования микроКЛКТ означает, что есть возможность сравнивать строение препаратов зубов до и после экспериментальных манипуляций. Из этого следует, что применение микроКЛКТ в эксперименте создает условия для моделирования клинических ситуаций, позволяет оценить последствия применения определенных инструментов и лечебных тактик [114, 126, 136, 151, 159, 169]. Некоторые авторы отмечают, что в ходе приготовления

препаратов, например при разрезании ножом, внешнее воздействие может внести изменения в структуру вещества. В результате на срезе получается картина, которая не соответствует реальному строению препарата. Сканирование с применением микроКЛКТ не требует специального приготовления препарата, и поэтому исключается нарушение его структуры в ходе исследования [132, 157]. МикроКЛКТ позволяет сохранять объекты для многоэтапного изучения и наблюдать изменения, происходящие в стоматологических материалах и анатомических препаратах в динамике под воздействием различных факторов [144, 156].

Изучение удаленных зубов детей разных возрастных групп при помощи микроКЛКТ дает представление о сроках минерализации зубной эмали. Результаты микроКЛКТ позволяют вычислить степень минерализации тканей зуба, с высокой точностью определить границы патологического изменения структуры и плотности эмали и дентина [32, 34, 35]. Экспериментальное исследование размеров, формы и плотности патологического очага препаратов удаленных зубов взрослых и детей позволяет судить о стадиях деминерализации твердых тканей в ходе прогрессирования естественного и искусственного кариозного поражения. Полученные данные обогащают представления о течении патологических процессов, последствиях лечебных и профилактических манипуляций, действии лечебных препаратов. Результаты данных исследований направлены на совершенствование профилактики и лечения кариеса [27, 28, 30, 51].

При изучении костей лицевого скелета микроКЛКТ позволяет наблюдать мелкие трабекулы губчатой кости, толщину и порозность кортикальной кости, минеральную плотность костных структур. В стоматологии методика применяется для экспериментальной оценки ремоделирования, уменьшения количества или восстановления структуры костной ткани под воздействием лекарственных средств, патологических процессов и лечебных вмешательств, или в присутствии имплантатов [50, 121, 125, 133]. Высокая информативность микроКЛКТ в оценке костной ткани была подтверждена гистоморфологическими исследованиями [133]. МикроКЛКТ – перспективная методика для гистоморфометрического анализа

последствий имплантации. В оценке количества костного вещества она превосходит гистологические тесты, которые неспособны вычислить точные количественные характеристики костного вещества в заданном объеме, а полагаются на заключения на основании свойств двухмерного среза [125]. Материалы биопсии и препараты человеческой кости применяются в микротомографических исследованиях *in vitro*, наблюдение процессов в костной ткани *in vivo* доступно у животных небольших размеров [50].

МикроКЛКТ применялась в небольшом количестве исследований физико-химических свойств эндодонтических материалов. МикроКЛКТ дополняла электронную микроскопию в исследовании формы, заполненной пломбировочным материалом, с целью визуализации его внутренней структуры, размера и расположения микрополостей в толще материала [156, 157]. В ряде исследований изучалось строение стоматологических материалов внутри корневых каналов зубов после эндодонтического лечения. Такие исследования обычно включают эндодонтическое лечение препаратов удаленных зубов с использованием различных материалов, инструментов и техник пломбирования с последующим анализом результатов лечения. МикроКЛКТ применяется для сканирования пролеченных препаратов зубов с последующим поиском полостей как в толще пломбировочных материалов, так и на границе их контакта с дентином [119, 134]. Трехмерные реконструкции микроКЛКТ обладают достаточно высоким разрешением, чтобы оценить структуру и распределение материалов во всем объеме пролеченных каналов до микроскопического уровня [9, 10, 80, 82]. МикроКЛКТ имеет потенциал в исследованиях, рассматривающих влияние эндодонтических материалов на ткани зуба, как показывает эксперимент, где она применялась для измерения плотности фрагментов дентина животных с искусственно созданными кариозными поражениями после контакта с различными цементными материалами [144].

Небольшое количество работ с использованием микроКЛКТ посвящено проблеме поломки инструментов в каналах зубов. Данных сканирования препаратов удаленных зубов при микроКЛКТ достаточно для построения

реалистичных трехмерных моделей зубов. После построения трехмерных реконструкций может быть выполнено виртуальное моделирование удаления фрагментов сломанных инструментов из корневых каналов, планирование процедуры и оценка рисков. Данные микроКЛКТ применялись для моделирования каналов зубов до и после манипуляций по удалению отломка, в том числе для количественной оценки толщины сохранившегося дентина [131]. Измерение количества сохранившегося дентина препаратов удаленных зубов, на которых была экспериментально проведена операция по удалению сломанных инструментов, позволяет судить об эффективности методик извлечения отломков из корневых каналов. В случаях, когда удаление сломанного инструмента невозможно, результаты микроКЛКТ позволяли сделать выводы о причинах неудачи при удалении [142]. Как методика неразрушающего поиска дефектов оборудования микроКЛКТ может применяться для изучения износа инструментов, применяемых в стоматологии. Например, был проведен поиска внутренних дефектов отработанных файлов при помощи оптической, электронной микроскопии и микрофокусной компьютерной томографии. МикроКЛКТ обнаруживала микротрещины в файлах, находившихся в использовании, что позволило судить о механизмах возникновения дефектов в зависимости от материала, размеров файла и условий использования [168].

Помимо кости и плотных инородных материалов, возможно исследование мягких тканей с контрастированием, но даже без контрастирования информативность реконструкций структур низкой плотности по данным микроКЛКТ высокая [132].

При изучении публикаций на тему микрофокусной компьютерной томографии в исследовании структур ЗЧС выявляются некоторые тенденции. Общее число зарубежных научных публикаций по данной теме в последние годы увеличилось, что показывает растущий интерес к новой методике. В то же время многие работы включают небольшое количество препаратов и сканирований и носят пробный характер, т. е. призваны скорее предсказать перспективность дальнейшего развития вопроса, чем раскрыть возможности методики. Отсутствуют

стандартизированные алгоритмы исследований с использованием микроКЛКТ. Из всех работ, приведенных выше и посвященных микроКЛКТ в стоматологии, только единичные публикации были написаны и опубликованы в России при участии небольшого числа авторских коллективов.

Основываясь на приведенных в данном обзоре работах, можно сделать заключение, что микрофокусная рентгенография – высокоинформативная, перспективная, но недостаточно распространенная в клинической медицине методика лучевого исследования, которой свойственны ограничения двумерных видов исследования. КЛКТ широко применяется в клинической практике, но ее возможности для повышения пространственного разрешения и подавления артефактов ограничены. Ознакомившись с особенностями данных методик, можно предположить, что микроКЛКТ позволит совместить их преимущества и компенсировать недостатки. Как можно видеть в результате анализа научных публикаций, ожидания высокой информативности новой методики подкрепляются результатами существующих исследований с использованием микроКЛКТ в медицине, в частности в стоматологии.

В будущем, очевидно, перспективной темой является всестороннее изучение возможностей микроКЛКТ в медицине. Данное диссертационное исследование посвящено одному из малоизученных направлений для применения микроКЛКТ. Результаты исследования были опубликованы в виде статей, входящих как в российские, так и в зарубежные базы данных. В публикациях представлены результаты всестороннего сравнительного анализа возможностей КЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ при изучении строения корневых каналов удаленных зубов [11, 12, 65, 67, 68, 69] и костной ткани в присутствии металлических конструкций [11, 63–65, 67, 81, 158]. Были впервые описаны рентгенологические характеристики структуры нескольких пломбировочных материалов по данным микроКЛКТ [13, 66, 69, 70, 80, 145, 148], изучена информативность КЛКТ и микроКЛКТ при визуализации сломанных металлических инструментов в корневых каналах зубов как до, так и после заполнения эндодонтическими материалами [13, 66, 69, 70, 145].

ГЛАВА 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена на кафедре лучевой диагностики стоматологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Диссертационное исследование состояло из трех этапов.

На первом этапе проводились сканирование препаратов удаленных зубов с использованием МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ и сравнительный анализ полученных данных.

На втором этапе выполнялось эндодонтическое лечение препаратов зубов с последующим сканированием при помощи КЛКТ и микроКЛКТ и сравнительным анализом данных компьютерной томографии.

На третьем этапе производились исследования препаратов нижней челюсти с использованием МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ и сравнительный анализ результатов.

2.1. Характеристика препаратов удаленных зубов на этапе сортировки

В работе использовались 76 препаратов зубов, которые были удалены по клиническим показаниям и имели поврежденные коронковые части и сохранные корни. Для исследования поверхность зубов очищалась механически, после чего препараты обрабатывались с использованием дистиллированной воды, спирта и перекиси водорода, а затем высушивались. В дальнейшем препараты удаленных зубов хранились в сухом виде.

Каждому из 76 препаратов был присвоен порядковый номер для отслеживания проведенных манипуляций и результатов рентгенологических исследований. Номера отмечались чернилами на поверхности корней зубов. Кроме того, для идентификации препаратов на последующих этапах исследования был

создан архив фотоснимков препаратов с указанием порядкового номера (рис. 1, а – в).

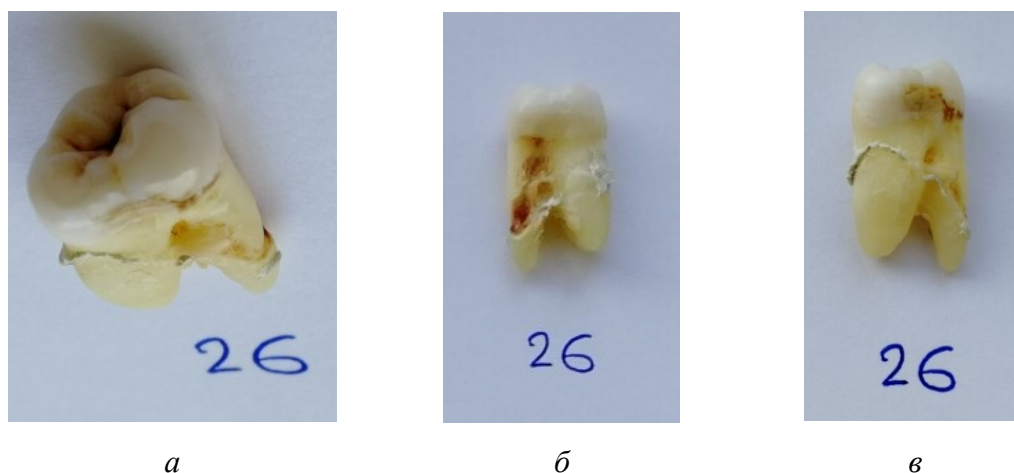


Рис. 1. Фотоснимки препарата удаленного зуба с 3 сторон: а – в – Для каждого из препаратов перед началом работы были сохранены фотографии в нескольких ракурсах

2.2. Обследование корней препаратов удаленных зубов до эндодонтического лечения

На первом этапе проводилось сканирование каждого из 76 непролеченных удаленных зубов, у которых насчитывалось 136 корней, с использованием КЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ (табл. 1). По результатам сканирований были построены двух- и трехмерные реконструкции и проведен их сравнительный анализ. Коронковые части зубов в ходе анализа не изучались, рассматривались только корни и корневые каналы.

Таблица 1

Количество непролеченных удаленных зубов в зависимости от положения зуба

Положение зуба	Количество непролеченных удаленных зубов	
	Абс.	%
12–22, 32–42	9	11,8
13, 23, 33, 43	7	9,2
14,15, 24, 25, 34, 35, 44, 45	16	21,1
16,17, 26, 27, 36, 37, 46, 47	27	35,5
18, 28, 38, 48	12	15,8
54, 74, 65, 85	5	6,6

2.3. Обследование корней препаратов удаленных зубов после эндодонтического лечения

На втором этапе проводилось эндодонтическое лечение корней препаратов удаленных зубов с использованием нескольких пломбировочных материалов. В результате корни пролеченных зубов были разделены на 7 групп, в зависимости от использованного для каждого корня алгоритма лечения. В каждой группе корневые каналы содержали определенные инородные материалы:

I. Фрагменты стальных и никель-титановых инструментов для обработки корневых каналов (K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители).

В ходе механической обработки корневых каналов в них были преднамеренно сломаны ручные и механические инструменты для эндодонтического лечения: K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители (рис. 2, а – в). После поломки фрагменты инструментов не извлекались из корневых каналов. Пломбирование корней, содержащих металлические фрагменты, не проводилось.

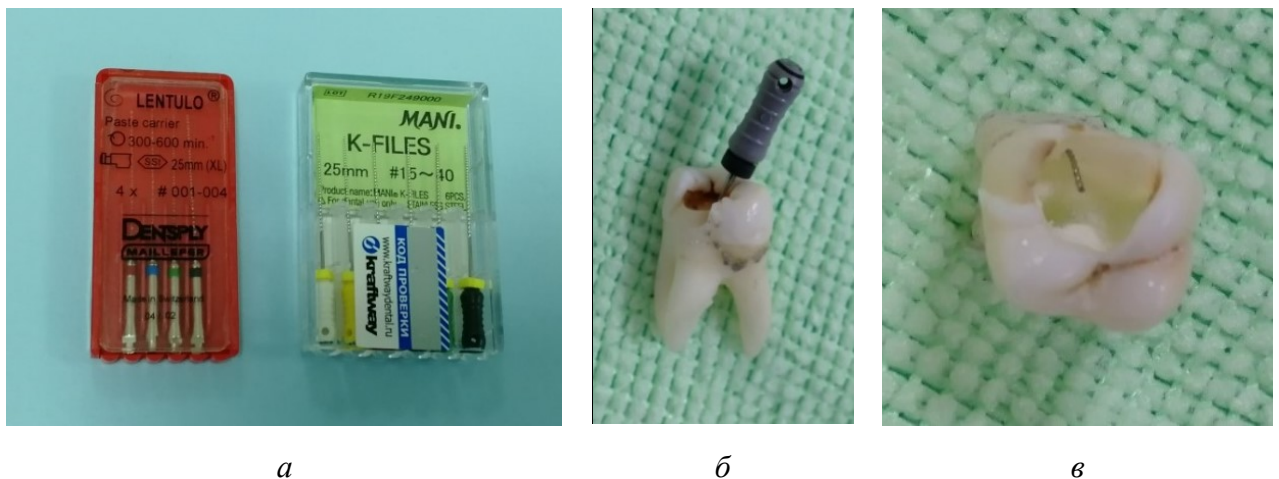


Рис. 2. Фотоснимки этапов приготовления препарата: *а* – внешний вид некоторых металлических инструментов, сломанных в корневых каналах; *б* – препарирование корня зуба; *в* – внешний вид удаленного зуба после препарирования, в корневом канале находится сломанный металлический инструмент

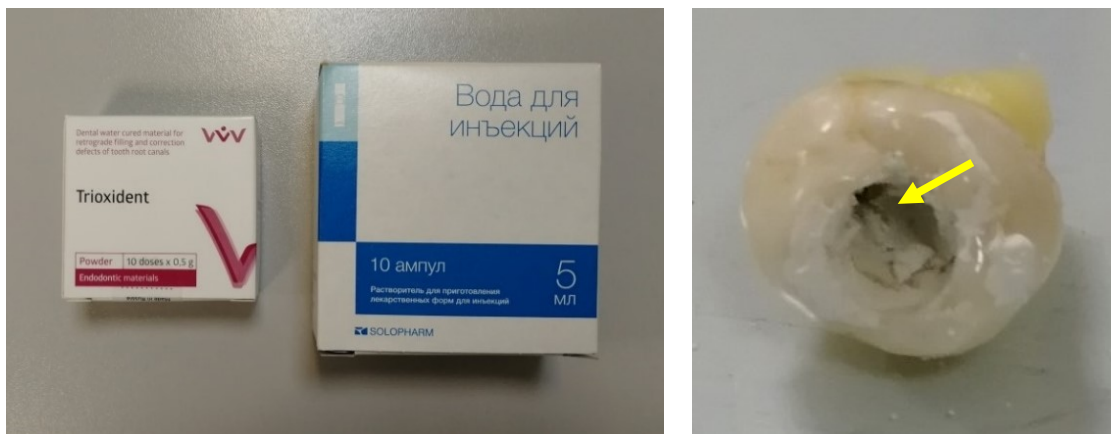
II. Кальций-алюмосиликатный цемент.

Кальций-алюмосиликатный цемент перед использованием хранился в виде

водорастворимого порошка (оксид кальция, оксид кремния, оксид алюминия, пластификатор, рентгеноконтрастный наполнитель оксид висмута, гидроокись меди-кальция). После препарирования корневых каналов зуба из порошка и воды для инъекций была приготовлена паста, которой заполнялись корневые каналы. Затем препараты высушивались до затвердевания цемента.

III. Фрагменты стальных и никель-титановых инструментов для обработки корневых каналов (K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители) и кальций-алюмосиликатный цемент.

На этапах препарирования корневых каналов и заполнения их пастой (кальций-алюмосиликатным цементом) в каналах были преднамеренно сломаны инструменты для эндодонтического лечения: K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители. Сломанные инструменты из каналов не извлекались, корни зубов пломбировались с фрагментами металла внутри каналов (рис. 3, а, б).



а

б

Рис. 3. Фотоснимки этапов приготовления препарата: а – вода и кальций-алюмосиликатный цемент в форме порошка для приготовления пасты; б – препарат удаленного зуба, корневой канал содержит кальций-алюмосиликатный цемент и фрагмент металлического инструмента (стрелка)

IV. Стандартные гуттаперчевые штифты для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи и силер – цинкоксидэвгенольный стоматологический материал.

После препарирования корневые каналы obturated с помощью стандартных гуттаперчевых штифтов методом латеральной конденсации холодной

гуттаперчи (рис. 4, а, б). В ходе пломбирования использовался цинкоксидэвгенольный силер, который представлял собой комплект из порошка (окись цинка, гидроксиапатит, рентгеноконтрастный наполнитель) и жидкости (эвгенол с пластифицирующими добавками), из которых перед применением приготавливают материал в виде пасты. После завершения пломбирования излишки гуттаперчи удалялись разогретым инструментом, препараты высушивались.

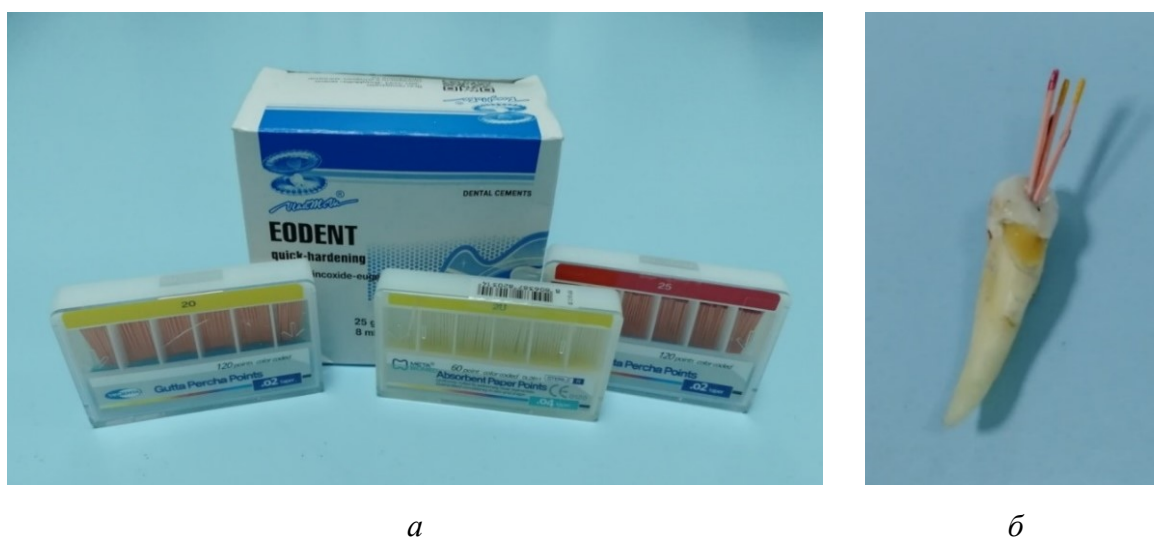


Рис. 4. Фотоснимки этапов приготовления препарата: *а* – комплект из порошка и жидкости для приготовления цинкоксидэвгенольного силера и гуттаперчевые штифты разных диаметров перед пломбированием удаленных зубов; *б* – препарат удаленного зуба, корневой канал содержит гуттаперчевые штифты для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи и цинкоксидэвгенольный силер

V. Фрагменты стальных и никель-титановых инструментов для обработки корневых каналов (K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители), стандартные гуттаперчевые штифты для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи и силер – цинкоксидэвгенольный стоматологический материал.

На этапах препарирования и obturation корневых каналов методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи при помощи стандартных гуттаперчевых штифтов и цинкоксидэвгенольного силера в каналах преднамеренно были сломаны инструменты для эндодонтического лечения: K file, H file, ProFile, ProTaper, каналонаполнители. Сломанные инструменты из каналов

не извлекались, корни зубов пломбировались с фрагментами металла внутри корневых каналов.

VI. Термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе.

В ходе пломбирования применялись obturаторы, состоящие из пластикового стержня-носителя, покрытого слоем холодной гуттаперчи (рис. 5) В систему входит печь для разогревания obturаторов, что придает термопластифицированной гуттаперче мягкую консистенцию. После препарирования производилось нагревание obturаторов и пломбирование корневых каналов путем введения горячей термопластифицированной гуттаперчи на пластиковом носителе.



Рис. 5. Фотоснимок внешнего вида obturаторов, состоящих из термопластифицированной гуттаперчи на пластиковом носителе, перед разогреванием и пломбированием

VII. Термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе в сочетании с силером – пломбировочным материалом на основе эпоксидной смолы.

Корневые каналы удаленных зубов были пролечены разогретой термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе. Перед введением разогретой гуттаперчи в каналы на их стенки наносился силер на основе эпоксидной смолы. Силер представлял собой комплект из двух паст: основы (эпоксидная олигомерная смола, этиленгликоля сацилат, субкарбонат висмута, фосфат кальция, оксид циркония) и катализатора (полиаминобензоат, триэтанолламин, субкарбонат висмута, фосфат кальция, оксид циркония), которые смешивались перед применением (рис. 6).



Рис. 6. Фотоснимок инструментов для лечения удаленных зубов горячей термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы. Силер хранился в виде шприца с двумя пастами

В ходе эндодонтического лечения 5 зубов вышли из эксперимента по причине невозможности пройти корневой канал или разрушения в ходе механической обработки, 1 зуб был заменен другим препаратом (табл. 2). У 13 препаратов были пролечены не все корни. После эндодонтической обработки у 71 удаленного зуба насчитывалось 109 пролеченных корней.

Таблица 2

Количество пролеченных удаленных зубов в зависимости от положения зуба

Положение зуба	Количество препаратов	
	Абс.	%
12–22, 32–42	9	12,7
13, 23, 33, 43	8	11,3
14, 15, 24, 25, 34, 35, 44, 45	15	21,1
16, 17, 26, 27, 36, 37, 46, 47	24	33,8
18, 28, 38, 48	11	15,5
54, 74, 65, 85	4	5,6

После эндодонтической обработки выполнялось сканирование корней всех пролеченных удаленных зубов при помощи КЛКТ и микроКЛКТ и проводился сравнительный анализ результатов исследования. По данным микроКЛКТ была создана и зарегистрирована база двухмерных микрофокусных изображений корней препаратов удаленных зубов, каналы которых содержат эндодонтические материалы и фрагменты сломанных металлических инструментов.

В итоге, были сделаны заключения об информативности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ 136 корней удаленных зубов до лечения, а также КЛКТ и микроКЛКТ 109 корней, каналы которых содержат высокоплотные инородные объекты (табл. 3).

Таблица 3

Количество корней удаленных зубов в зависимости от содержимого корневых каналов

Содержимое корневых каналов	Количество корней
Отсутствует, корневые каналы не пролечены	136
Только фрагменты металлических инструментов	26
Только кальций-алюмосиликатный цемент	20
Фрагменты металлических инструментов и кальций-алюмосиликатный цемент	9
Гуттаперчевые штифты для латеральной конденсации холодной гуттаперчи и цинкоксидэвгенольный силер	30
Гуттаперчевые штифты для латеральной конденсации холодной гуттаперчи, цинкоксидэвгенольный силер и фрагменты металлических инструментов	10
Термопластифицированную гуттаперчу на пластиковом носителе	6
Обтураторы термопластифицированную гуттаперчу на пластиковом носителе и силер на основе эпоксидной смолы	8

2.4. Характеристика препаратов нижних челюстей

В ходе работы использовались 4 препарата высушенных костей нижних челюстей, предоставленных НИИ и Музеем антропологии МГУ (рис. 7, а – г).



Рис. 7. Фотоснимки препаратов нижней челюсти с металлическими конструкциями (а, в), и без металла (б, г) перед сканированием

Каждому препарату был присвоен порядковый номер, после чего производился визуальный осмотр челюстей и фиксировались такие особенности, как сохранившиеся зубы, наличие эндодонтически пролеченных зубов, линии перелома тела нижней челюсти и металлические конструкции, закрепленные на зубах и кости (табл. 4). Затем проводились КЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ каждой челюсти с последующим построением двухмерных и трехмерных реконструкций и их сравнительным анализом.

Особенности препаратов нижних челюстей по результатам осмотра

Номер препарата	Положение сохранившихся зубов	Перелом челюсти	Наличие металлических конструкций
1	36–38, 34, 48–45	Линия перелома от нижнего края тела челюсти справа, направляется косо через лунку отсутствующего зуба 43, перелом полный	На зубах 37, 36, 34, 47–45 закреплена металлическая проволока для бимаксиллярного шинирования. Фрагменты тела нижней челюсти зафиксированы в области линии перелома четырехзвеньеовой титановой пластиной с 4 винтами
2	36, 45, 46	Нет	Нет
3	44, 47	Нет	Ортопедическая конструкция, закрепленная на коронковых частях сохранившихся зубов 44, 47. Проволочные крючья, продетые через отверстия в правой и левой ветвях нижней челюсти (для фиксации препарата при хранении, не являются ортопедической конструкцией)
4	36, 34, 33, 41, 45, 46	Нет	Нет

2.5. Методы лучевого исследования препаратов зубов и челюстей

Препараты удаленных зубов до лечения и препараты нижней челюсти были исследованы при помощи МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ. Препараты зубов, пролеченные эндодонтически, были исследованы с применением КЛКТ и микроКЛКТ.

Мультисрезовая компьютерная томография

МСКТ проводилась на аппарате Philips Brilliance 64 (Philips, США) (рис. 8).

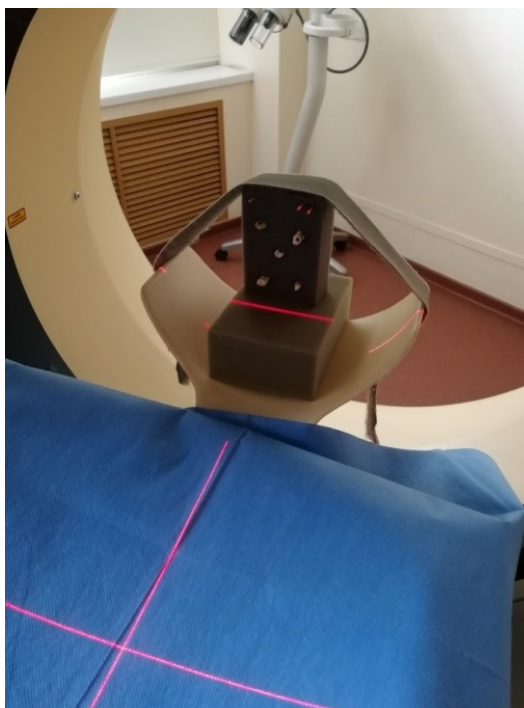


Рис. 8. Фотоснимок препаратов удаленных зубов на этапе проведения МСКТ, аппарат Philips Brilliance 64

В ходе сканирования были выбраны алгоритмы для исследования мелких костных структур черепа (табл. 5).

Таблица 5

Параметры сканирования для МСКТ

Объект исследования	Параметры сканирования			
	Напряжение, кВ	Экспозиция, мАс	Толщина среза, мм	Шаг сканирования, мм
Препараты нижней челюсти	140	400	0,55	0,27
Препараты удаленных зубов	120	100	0,9	0,45

В ходе сканирования зубы и челюсти фиксировались при помощи рентгенонегативных материалов. Положение тела и ветвей нижних челюстей и корней удаленных зубов располагалось в направлении, аналогичном положению зубов и нижней челюсти у пациента в ходе сканирования.

В результате сканирования были получены данные в формате DICOM. Реконструкция и анализ МСК-томограмм производились с использованием программного обеспечения Radiant и 3D Slicer.

Конусно-лучевая компьютерная томография

КЛКТ проводилась на аппарате Kavo OP 3D Vision (Imaging Sciences International LLC, США) (рис. 9).



Рис. 9. Фотоснимок препарата удаленного зуба на этапе проведения КЛКТ, аппарат Kavo OP 3D Vision

В ходе сканирования были выбраны алгоритмы высокого разрешения, заданные производителем (табл. 6).

Таблица 6

Параметры сканирования для КЛКТ

Объект исследования	Параметры сканирования		
	Напряжение, кВ	Сила тока, мА	Размер вокселя, мм
Препараты нижних челюстей	120	5	0,200
Препараты удаленных зубов	120	5	0,125

В ходе сканирования зубы и челюсти фиксировались при помощи рентгенонегативных материалов. Положение тела и ветвей нижних челюстей и корней удаленных зубов располагалось в направлении, аналогичном положению зубов и нижних челюстей у пациента в ходе сканирования.

В результате сканирования было получено 60400 файлов в формате DICOM. Реконструкция и анализ изображений по данным КЛКТ производились с использованием программного обеспечения iCAT Vision, Radiant и 3D Slicer.

Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография

Сканирование микроКЛКТ (табл. 7) проводилось в процессе тестирования новой модели отечественного микрофокусного конусно-лучевого томографа МРКТ-04 (кафедра ЭПУ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), РФ).

Таблица 7

Алгоритмы сканирования для микроКЛКТ

Объект исследования	Параметры сканирования		
	Напряжение, кВ	Сила тока, мкА	Размер вокселя, мкм
Препараты нижней челюсти	92	60	20
	120	25	44
Препараты удаленных зубов	92	60	8–20

В ходе сканирования зубы и челюсти фиксировались при помощи рентгенонегативных материалов. Положение тела и ветвей нижних челюстей и корней удаленных зубов располагалось в вертикальном направлении, причем во время сканирования происходило вращение препарата вокруг вертикальной оси (рис. 10).

В результате сканирования было получено 287809 файлов в формате TIFF. Реконструкция и анализ изображений на основании данных микроКЛКТ производились с использованием программного обеспечения 3D Slicer.



Рис. 10. Фотоснимок препарата удаленного зуба на этапе проведения микроКЛКТ, аппарат МРКТ-04

После завершения сканирований производились построение и сравнительный анализ мультипланарных реконструкций в коронарных, сагиттальных, аксиальных и косых проекциях и трехмерных (табл. 8).

Таблица 8

Программное обеспечение для обработки данных разных методик компьютерной томографии

Методика	Формат данных	Построение мультипланарных реконструкций	Построение объемных реконструкций
МСКТ	DICOM	Radiant	3D Slicer
КЛКТ	DICOM	iCAT Vision, Radiant	3D Slicer
МикроКЛКТ	TIFF	3D Slicer	3D Slicer

Мультипланарные реконструкции пролеченных зубов и зубов с фрагментами сломанных инструментов по данным микроКЛКТ были зарегистрированы в виде базы данных (свидетельство о регистрации базы данных № 2021620403 от 04.03.2021).

Таким образом, был разработан алгоритм исследования препаратов удаленных зубов до и после эндодонтического лечения, а также препаратов нижних челюстей по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ.

2.6. Статистическая обработка результатов исследования

Все данные, полученные при исследовании препаратов при помощи МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ, вводились в специально разработанную таблицу в программе Microsoft Office Excel 2019 / Windows 10. Для вычисления отношений полученных величин и построения диаграмм использовалось программное обеспечение Microsoft Office Excel 2019 / Windows 10. Для оценки достоверности заключений по результатам исследования применялся пакет статистических прикладных программ SPSS 16.0. В ходе анализа при помощи статистического критерия Вилкоксона для непараметрических данных проводились сравнения результатов МСКТ и КЛКТ, КЛКТ и микроКЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ зубов до лечения с целью оценить значимость различий по ряду параметров:

1. число дополнительных каналов в апикальной части корня, которые заканчиваются собственными отверстиями на поверхности корня.
2. число корней, в которых основные каналы разделялись на несколько близких по диаметру каналов в апикальной части корня.
3. число дополнительных корневых каналов, которые заканчивались отверстиями на поверхности зуба не в апикальной области корня.
4. число корней, в которых дополнительные каналы соединяют между собой основные каналы, т.е. формируют анастомозы.
5. число корней, в каналах которых обнаруживалось содержимое.
6. число корней, в которых были обнаружены продольные линии перелома, которые сообщались с полостью корневого канала.

Сравнение между данными КЛКТ и микроКЛКТ для оценки значимости различий в результатах исследований зубов, каналы которых содержали фрагменты металлических инструментов, происходило по такому же критерию по параметрам:

1. длина трехмерной модели фрагмента сломанного металлического инструмента в корневом канале зуба.
2. площадь поверхности трехмерной модели фрагмента сломанного металлического инструмента в корневом канале зуба.

3. объем трехмерной модели фрагмента сломанного металлического инструмента в корневом канале зуба.

Для оценки результатов исследования референсный метод не применялся по ряду причин. Анамнез и результаты клинического осмотра были недоступны в экспериментальном исследовании удаленных зубов. Микроскопия не применялась, так как обзор научных публикаций по теме работы выявил, что разрушающие методики вносят изменения в структуру препаратов на микроскопическом уровне, и допустимость использования микроскопии в качестве референсного метода для анализа результатов микроКЛКТ не доказана. Кроме того, диссертационное исследование изучало исключительно неразрушающие методики исследования, важной особенностью которых являлось полное отсутствие вмешательства в структуру объектов.

Таким образом, была разработана методология всестороннего сравнительного анализа результатов исследований МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ препаратов нижней челюсти, в том числе с массивными металлическими конструкциями, и удаленных зубов до и после эндодонтического лечения, а также с преднамеренно сломанными в корневых каналах металлическими инструментами.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Информативность МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ при визуализации нижних челюстей и удаленных зубов, в том числе в присутствии высокоплотных инородных материалов, определялась при сравнительном анализе данных исследования каждого из препаратов. В ходе анализа происходило описание мультипланарных и трехмерных реконструкций по отдельности для каждого вида компьютерной томографии с последующими сопоставлением и статистической обработкой результатов. После завершения сравнения проводилось повторное построение реконструкций для всех 3 методик исследования одновременно, что дало возможность наглядно подтвердить различия.

3.1. Исследование корней препаратов удаленных зубов до лечения

На первом этапе экспериментального исследования было проанализировано строение 136 корней ($n = 136$) у 71 удаленного зуба. Сравнительный анализ проводился по 6 критериям, которые характеризовали возможности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ при визуализации мелких деталей и малоконтрастных структур.

3.1.1. Дополнительные корневые каналы в апикальной части корней зубов, заканчивающиеся апикальными отверстиями

Корневые каналы на мультипланарных реконструкциях МСКТ и КЛКТ имели размытые очертания и определялись не во всех случаях (рис. 11, а, б). На микроКЛКТ-томограммах корневые каналы имели четкие очертания (рис. 11, в), за исключением изображений, на которых наблюдались нечеткость или удвоение контуров в результате погрешностей в ходе сканирования по причине подвижности источника рентгеновского излучения, объекта и приемника относительно друг друга во время сканирования.

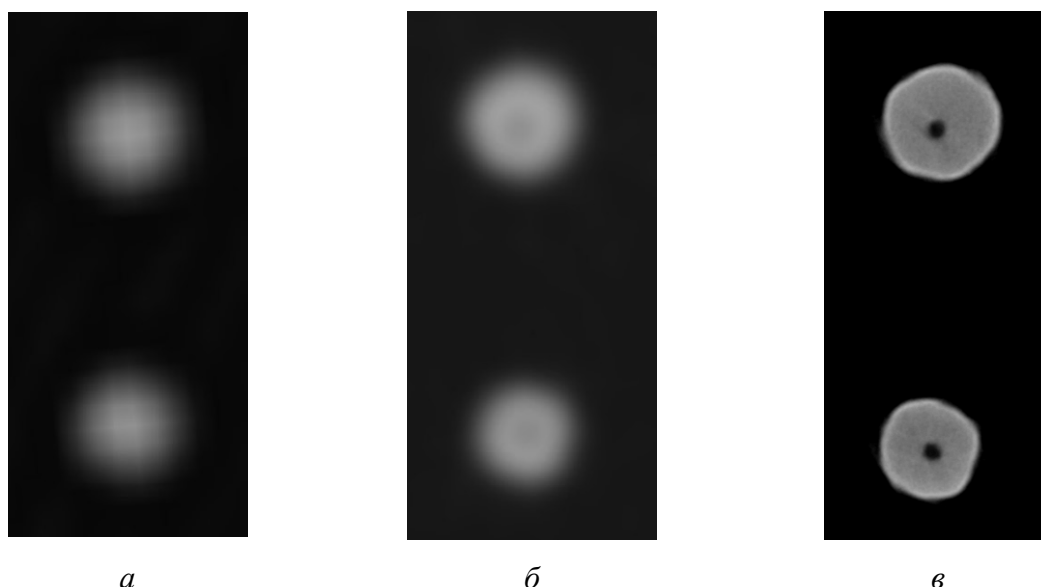


Рис. 11. Изображения апикальной части корней удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Корневые каналы не определяются; *б* – КЛКТ-томограмма. Каналы имеют нечеткие очертания; *в* – микроКЛКТ-томограмма. Очертания каналов четкие

По данным МСКТ не было обнаружено дополнительных каналов в апикальной части ни у одного из корней удаленных зубов. По результатам КЛКТ дополнительные корневые каналы, заканчивающиеся отверстием на поверхности корня, встречались в 17,6% ($n = 24$) случаев, а по данным микроКЛКТ – в 42,6% ($n = 58$) случаев.

Количество дополнительных корневых каналов в апексе одного и того же корня по результатам КЛКТ и микроКЛКТ совпадало в 4,4% ($n = 6$) случаев. Во всех остальных корнях, кроме одного, при помощи микроКЛКТ выявлялось больше дополнительных апикальных каналов и их апикальных отверстий, чем на КЛКТ (рис. 12, а–в).

В апикальной части корня дополнительные мелкие корневые каналы начинались от более крупных каналов или один крупный канал в апикальной части разделялся на несколько микроскопических каналов близкого диаметра. Единичные дополнительные каналы направлялись к поверхности корня зуба, где они заканчивались отверстием, а множественные корневые каналы на пути к апикальному отверстию могли изгибаться, сообщаться между собой, многократно разделяться и иметь слепые ответвления.

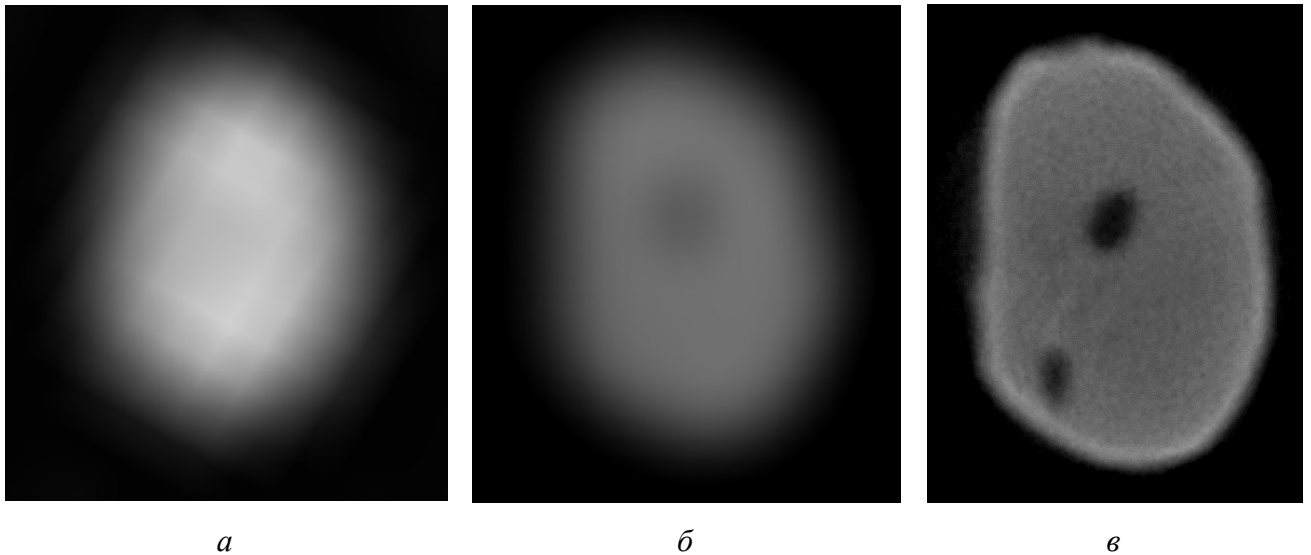


Рис. 12. Изображения апикальной части корня удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Корень имеет нечеткие контуры и практически не различимый канал; *б* – КЛК-томограмма. Очертания корневого канала размытые; *в* – микроКЛК-томограмма. Четкие очертания двух каналов, включая дополнительный

Таким образом, в ходе анализа томограмм информативность микроКЛКТ в визуализации дополнительных корневых каналов и их отверстий в апикальной части корня значительно превосходила информативность МСКТ и КЛКТ (рис. 13).

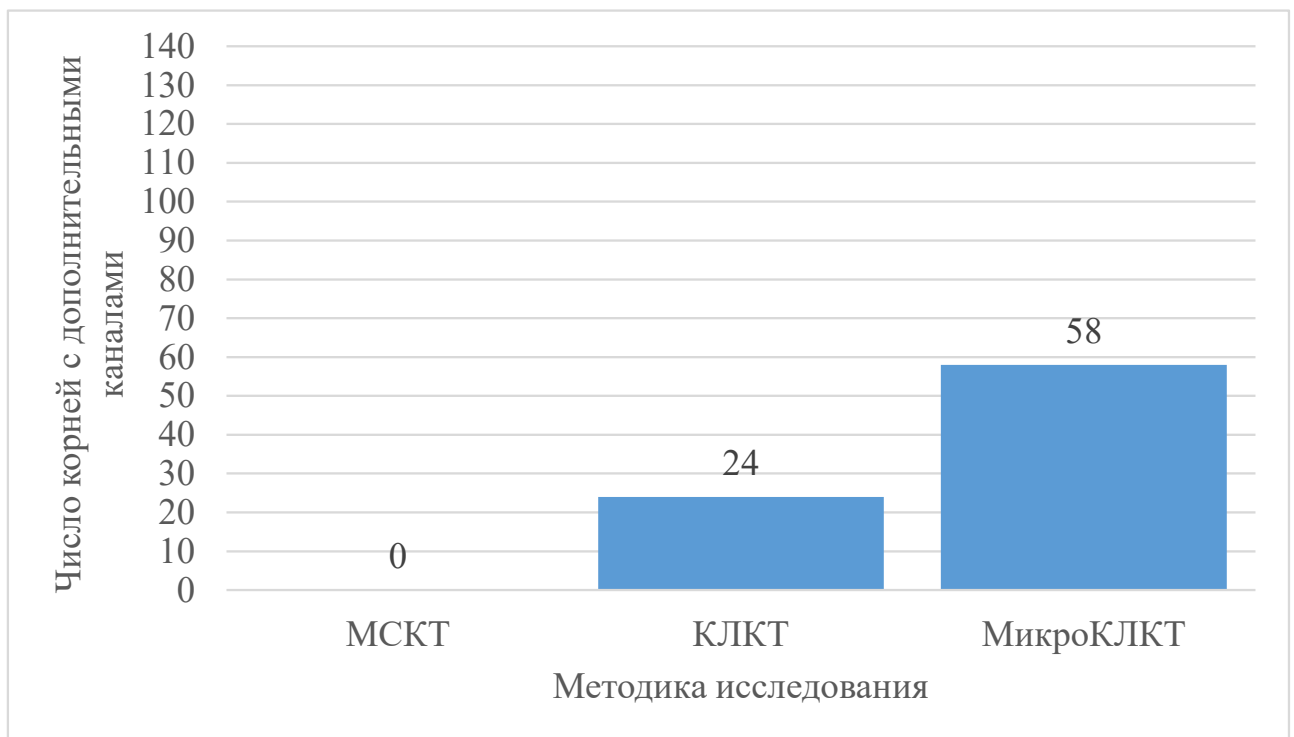


Рис. 13. Диаграмма числа корней, в апикальной части которых были обнаружены дополнительные каналы, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

3.1.2. Корни, в апикальной части которых каналы разделялись на несколько близких по диаметру каналов

На МСК- и КЛК-томограммах разделение одного канала на множество микроскопических выглядело как исчезновение корневого канала в области верхушки корня и отсутствие апикального отверстия. На микроКЛКТ можно было проследить все образовавшиеся мелкие каналы до их отверстий на поверхности корня (рис. 14, а – в).

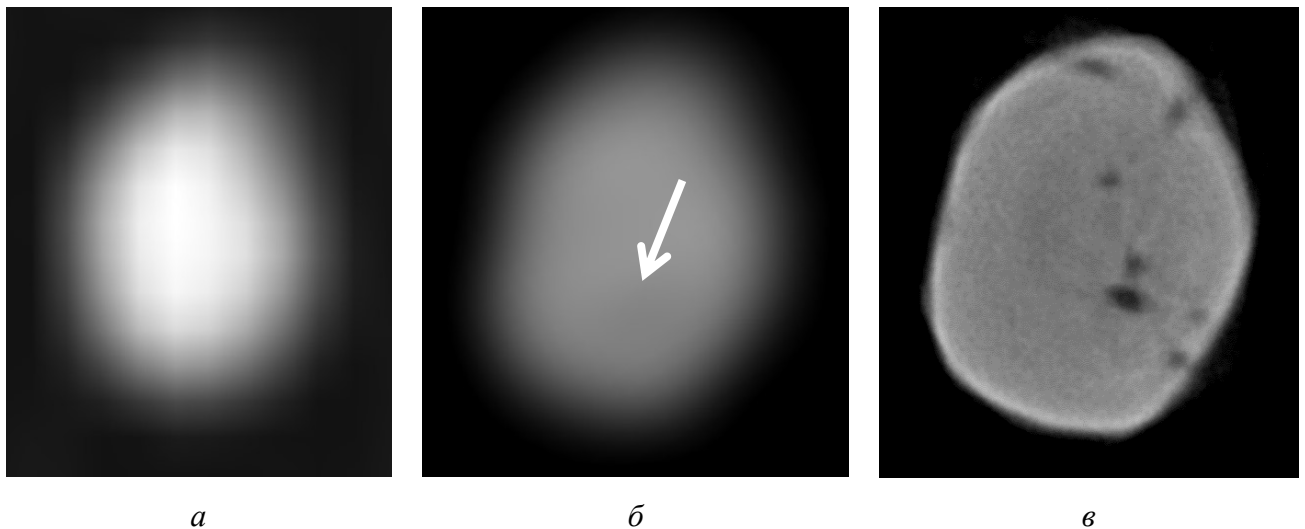


Рис. 14. Изображения апикальной части корня удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Корневые каналы не определяются; *б* – КЛК-томограмма. Слабо заметные очертания одного из каналов (*стрелка*); *в* – микроКЛКТ-томограмма. Множество мелких корневых каналов

Обнаружить разделение корневого канала на несколько близких по диаметру мелких каналов в апикальной части корня при помощи МСКТ удалось всего в 0,7% ($n = 1$) случаев, с использованием КЛКТ – в 8,1% ($n = 11$) случаев, микроКЛКТ – в 18,4% ($n = 25$) случаев. Количество образовавшихся после разделения корневых каналов по данным КЛКТ и микроКЛКТ совпадало в 3,7% ($n = 5$) случаев только в некоторых корнях, где один канал разделялся на два. В остальных ситуациях по результатам микроКЛКТ после разделения формировалось большее число дополнительных каналцев, чем было видно на КЛКТ.

Таким образом, микроКЛКТ была более информативной методикой для обнаружения разделения корневых каналов в апикальной части корня по сравнению с МСКТ и КЛКТ (рис. 15).

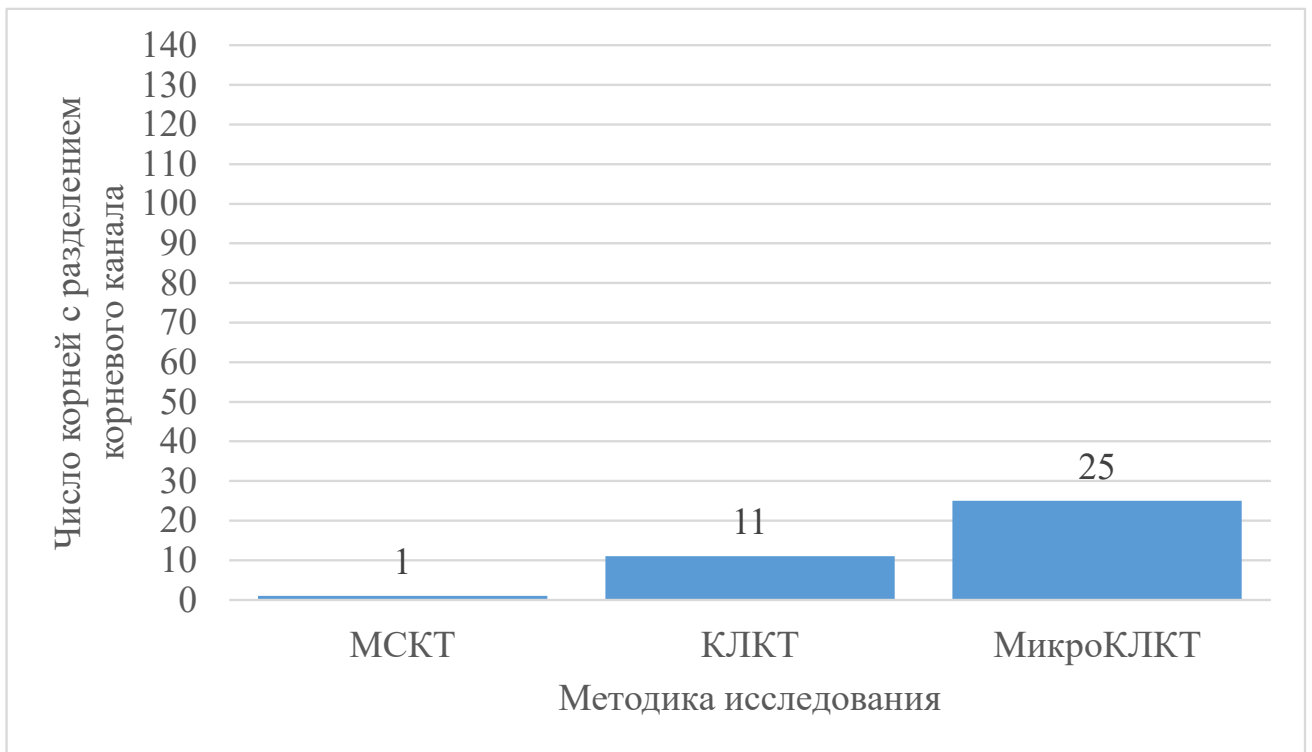


Рис. 15. Диаграмма числа корней, в апикальной части которых корневой канал разделялся на несколько близких по диаметру, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

3.1.3. Дополнительные корневые каналы с отверстиями на поверхности корня не в апикальной части зуба

При изучении томограмм корней препаратов зубов проводился анализ с целью выявить дополнительные корневые каналы, которые открывались отверстием на поверхности корня, но не в апикальной его части. На сериях МСК-томограмм препаратов зубов такие каналы не диагностировались. При анализе КЛК-томограмм выявлялись дополнительные каналы, заканчивавшиеся отверстием на поверхности корня на расстоянии от верхушки в 7,3% (n = 10) случаев. МикроКЛКТ была самой информативной методикой, так как при ее использовании дополнительные каналы обнаруживались в 10,3% (n = 14) случаев (рис. 16).

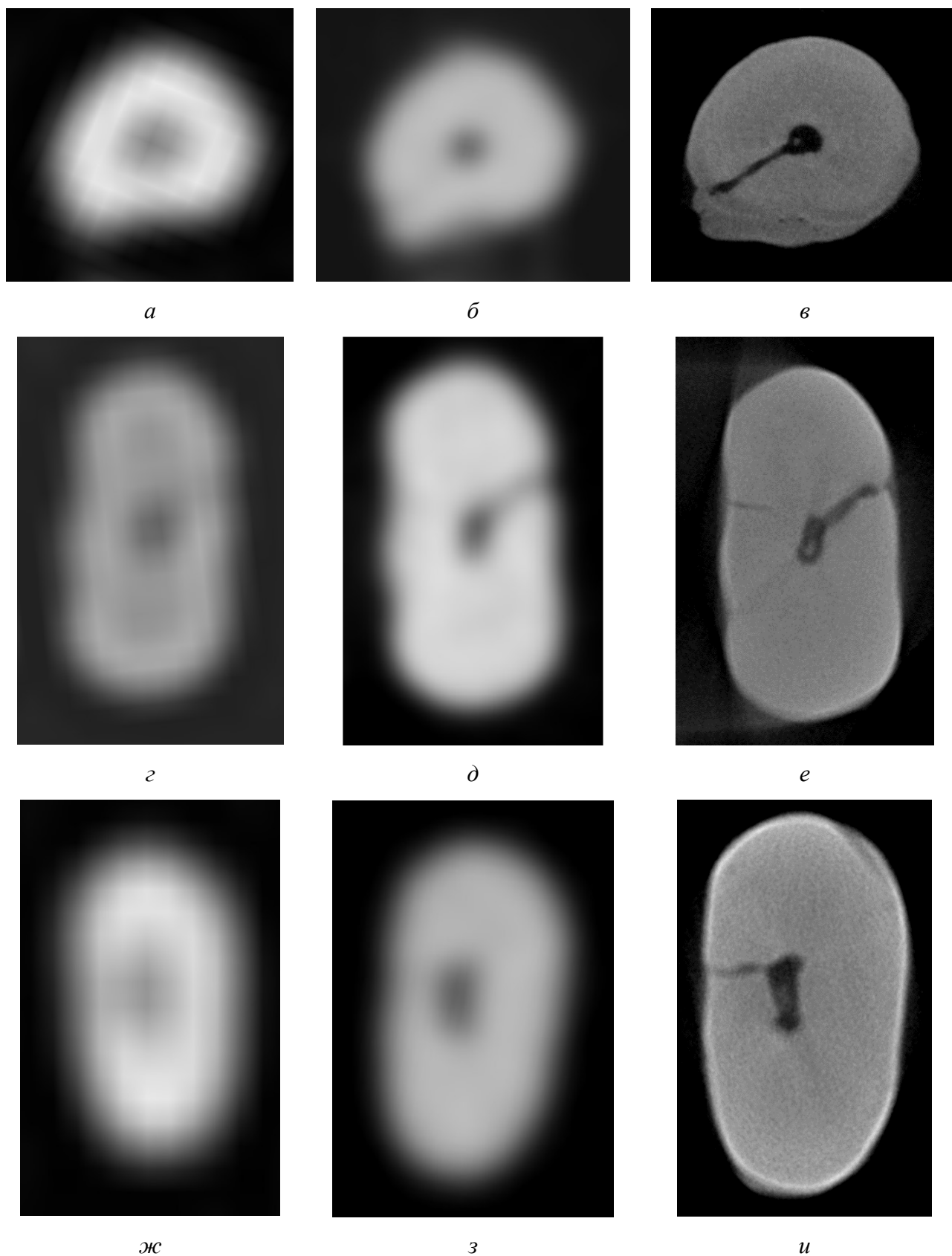


Рис. 16. Изображения средней части корней удаленных зубов в аксиальной плоскости: *а, г, ж* – МСК-томограммы. Дополнительные каналы не определяются; *б, д, з* – КЛК-томограммы. Дополнительный канал четко визуализируется в одном случае (*д*); *в, е, и* – микроКЛК-томограммы. Четкие очертания горизонтальных дополнительных каналов

Количество каналов вне апикальной части в одном и том же корне по данным КЛКТ и микроКЛКТ совпало в 5,9% ($n = 8$) наблюдений, во всех остальных случаях на микроКЛКТ-томограммах число каналов было больше.

Таким образом, исследования микроКЛКТ были наиболее информативны в выявлении дополнительных корневых каналов с отверстиями на поверхности корня за пределами апикальной части корня зуба (рис. 17).

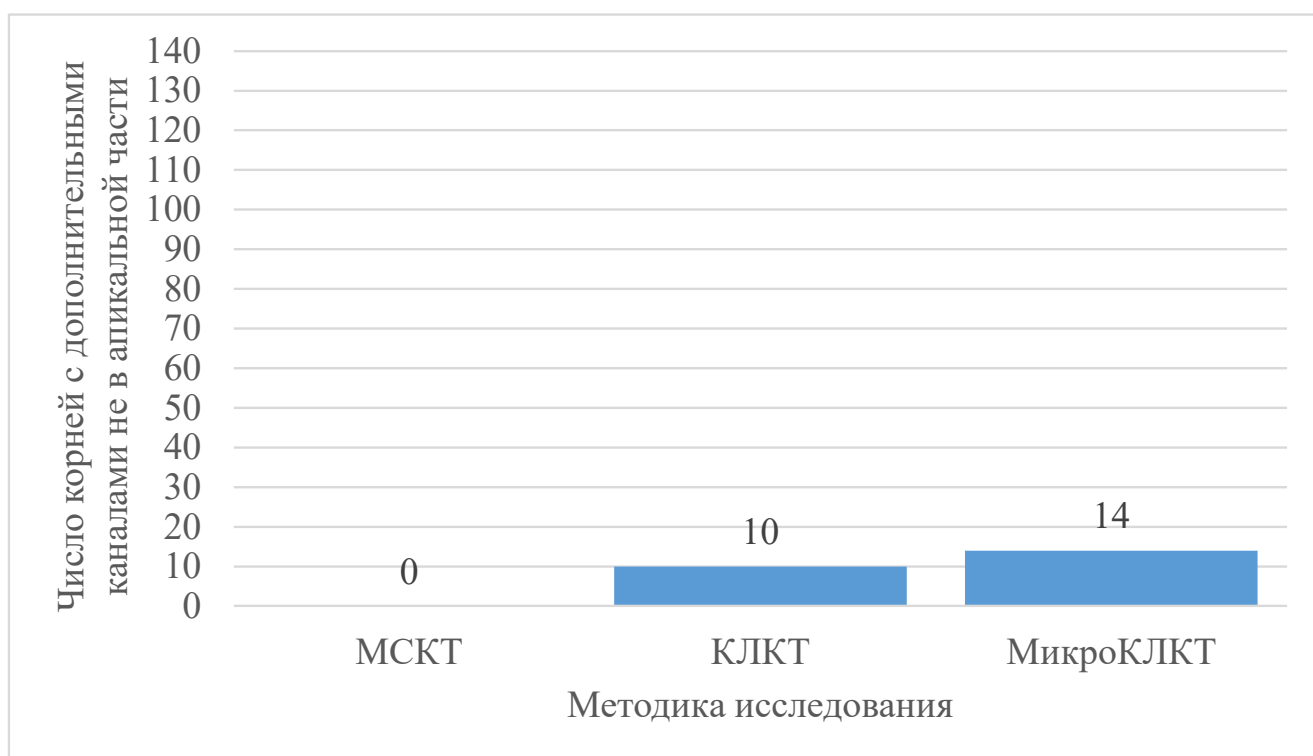


Рис. 17. Диаграмма числа корней, в которых обнаруживались дополнительные корневые каналы не в апикальной части, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

3.1.4 Анастомозы между продольно направленными коревыми каналами

Между двумя и более продольно направленными каналами в одном корне могли образовываться анастомозы, представленные тонкими или щелевидными каналами (рис. 18, а – в).

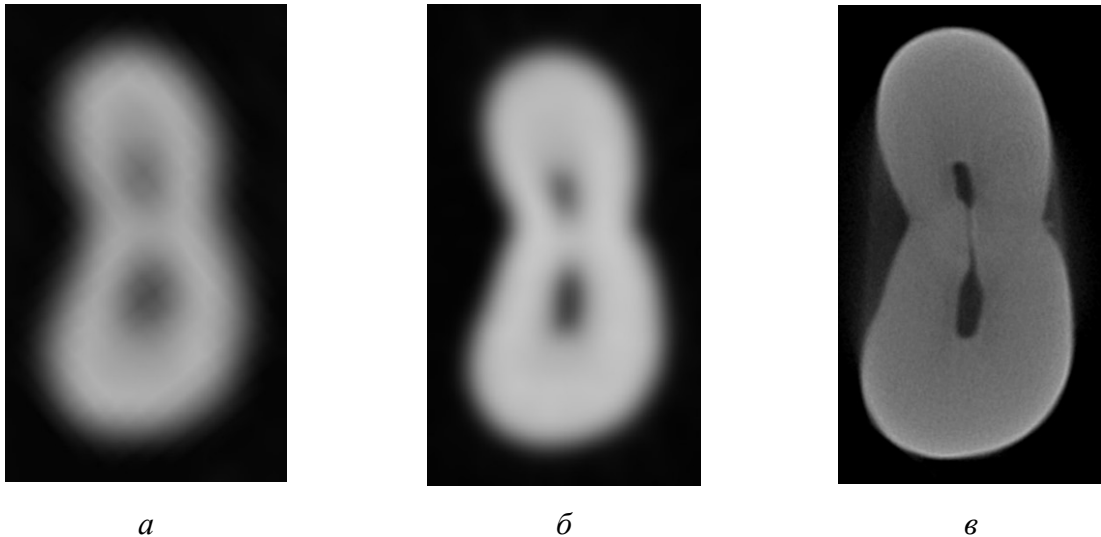


Рис. 18. Изображения средней части корня удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а, б* – МСК-томограмма и КЛК-томограмма. Сообщения между корневыми каналами нет; *в* – микроКЛК-томограмма. Дополнительный горизонтальный корневой канал небольшого диаметра соединяет основные корневые каналы

По данным МСКТ при наличии в одном корне нескольких каналов сообщения между ними не наблюдалось. По результатам КЛКТ в 5,1% ($n = 7$) случаев обнаруживались анастомозы в форме горизонтально и косо горизонтально направленных узких каналов, соединяющих два крупных продольных канала. При помощи микроКЛКТ такие анастомозы обнаруживались в 13,2% ($n = 18$) случаев (рис. 19, *а – в*).

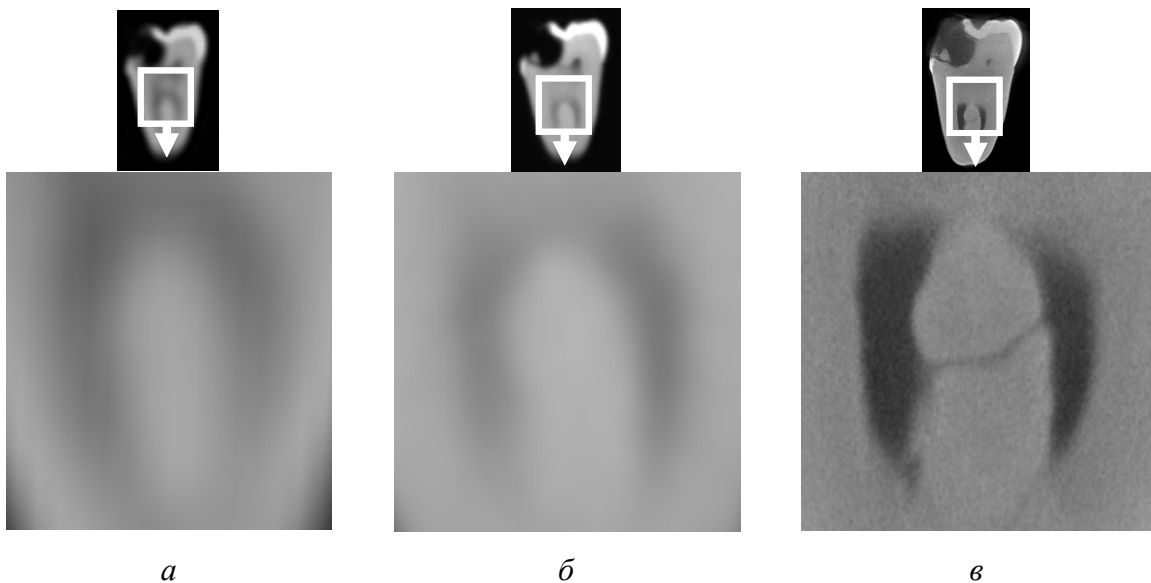


Рис. 19. Фрагменты изображений средней части корня удаленного зуба в продольной плоскости: *а, б* – МСК-томограмма и КЛК-томограмма. Дополнительные корневые каналы не видны; *в* – микроКЛК-томограмма. Дополнительный косо горизонтальный корневой канал соединяет продольно направленные основные каналы

В отличие от МСКТ и КЛКТ, на микроКЛКТ можно было обнаружить, что в некоторых случаях в пространстве между каналами в одном корне находились множественные анастомозы (рис. 20, а – в), извитые слепые ответвления, щелевидные пустоты и полости наподобие сети из большого числа микроскопических каналов сложной формы.

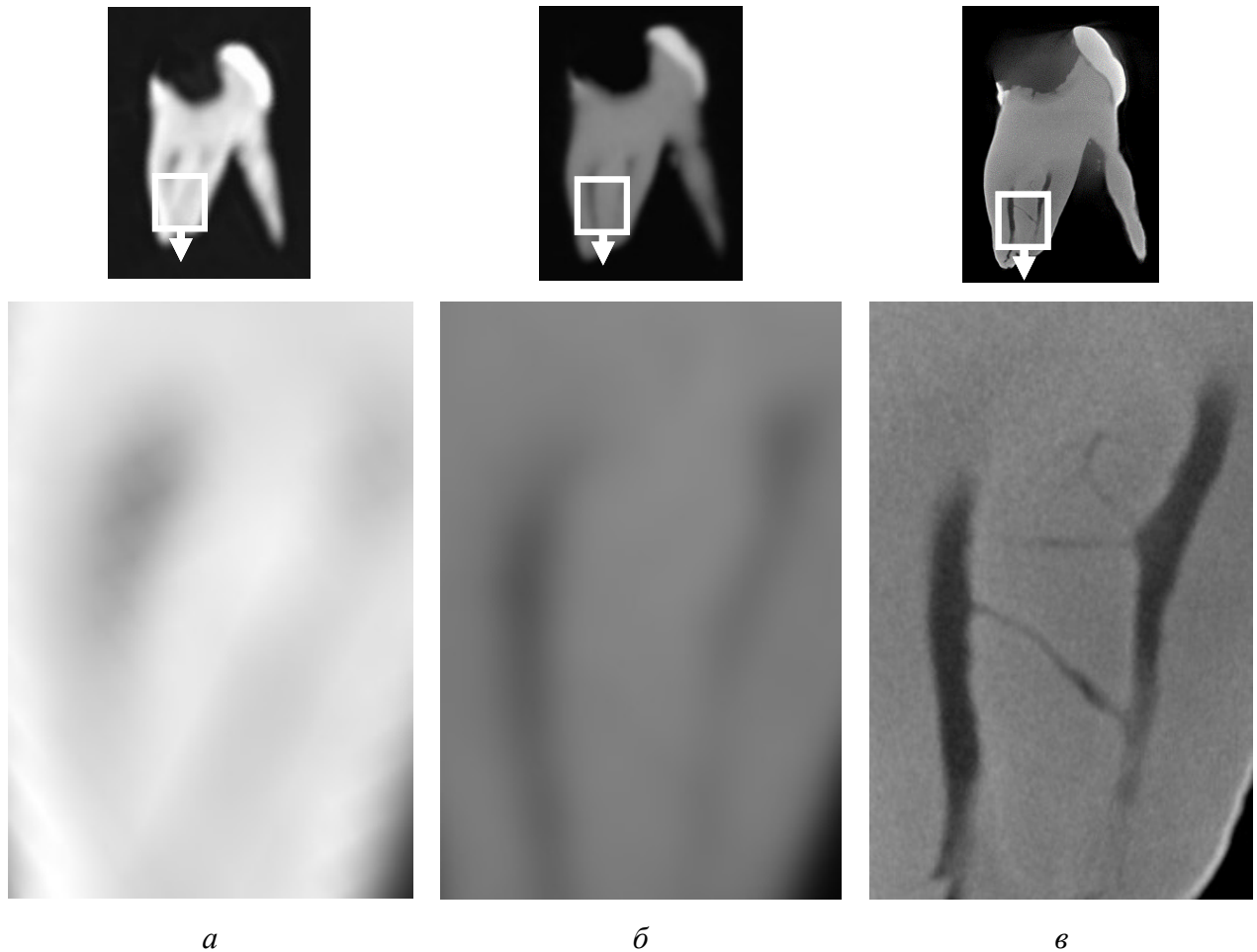


Рис. 20. Фрагменты изображений средней части корня удаленного зуба в продольной плоскости; *а* – МСК-томограмма. Дополнительные корневые каналы не определяются; *б* – КЛК-томограмма. Размытые очертания практически незаметного горизонтального канала; *в* – микроКЛК-томограмма. Дополнительные горизонтальные и косо направленные каналы формируют анастомозы между основными корневыми каналами

Таким образом, микроКЛКТ была наиболее информативной методикой для обнаружения анастомозов между несколькими каналами в одном корне (рис. 21).

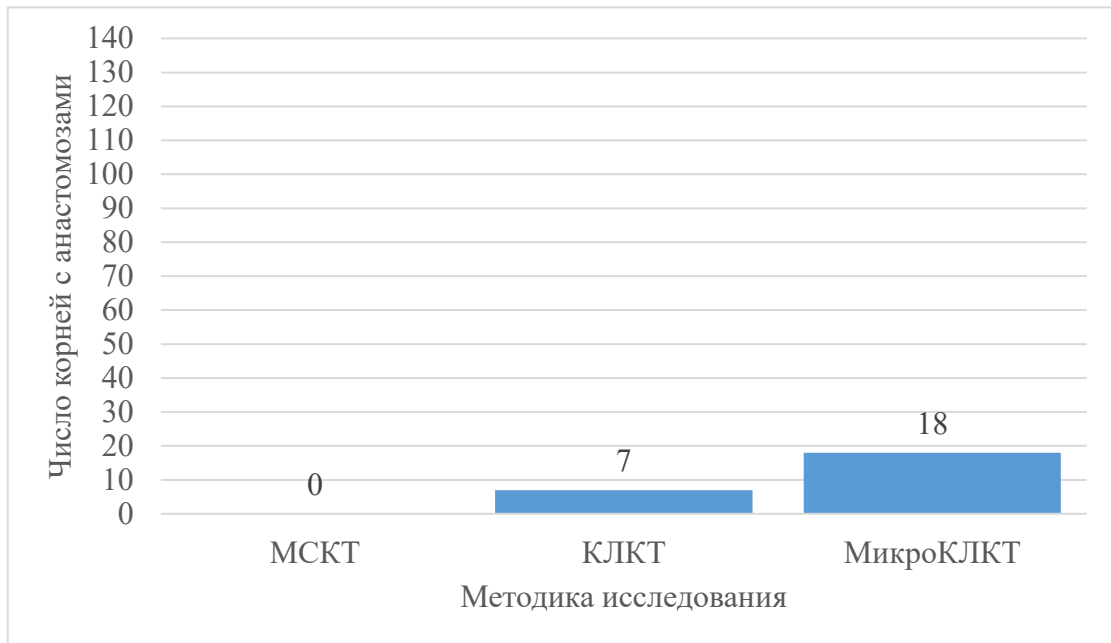


Рис. 21. Диаграмма числа корней, в которых были обнаружены анастомозы между продольно направленными основными каналами, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

3.1.5. Содержимое в полости корневых каналов

По данным МСКТ содержимое в полости корневых каналов не обнаруживалось. Плотные округлые или точечные образования встречались по данным КЛКТ в 14,7% ($n = 20$) случаев. По результатам микроКЛКТ $n = 97$ (71,3%) корней имели содержимое в каналах (рис. 22, а – в; 23, а – в).

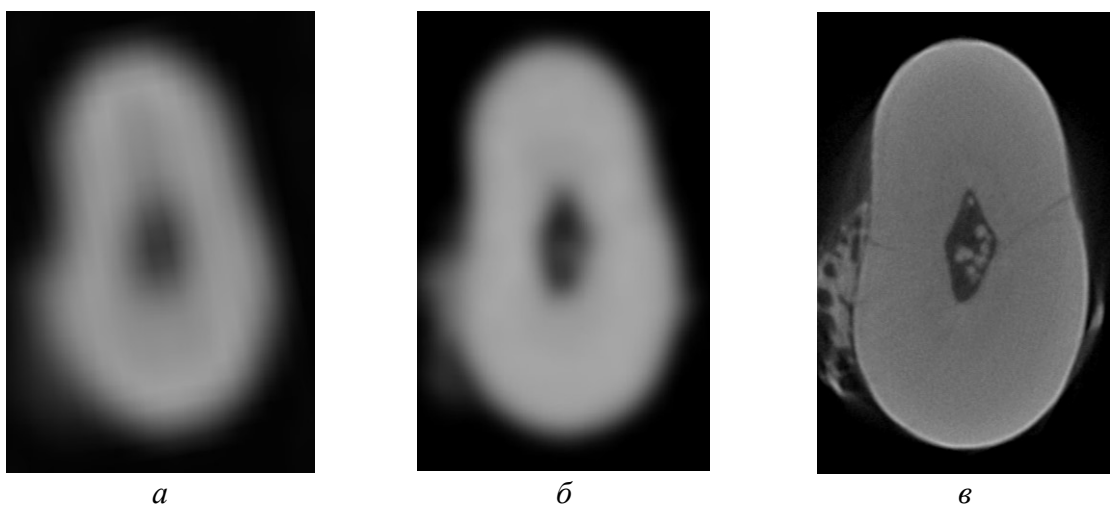


Рис. 22. Изображения средней части корня удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Содержимое в корневом канале не наблюдается; *б* – КЛК-томограмма. Единичное включение высокой плотности с размытыми контурами в корневом канале; *в* – микроКЛК-томограмма. Хорошо видно в корневом канале скопление округлых элементов различных размеров с четкими контурами, плотность которых сопоставима с дентином

В отличие от МСКТ и КЛКТ, характер структур, обнаруженных внутри каналов при использовании микроКЛКТ, отличался многообразием в размерах, форме и плотности. В некоторых случаях это были округлые или точечные включения, сопоставимые по плотности с дентином (см. рис. 22, в), или бесформенные плотные образования (см. рис. 23, в).

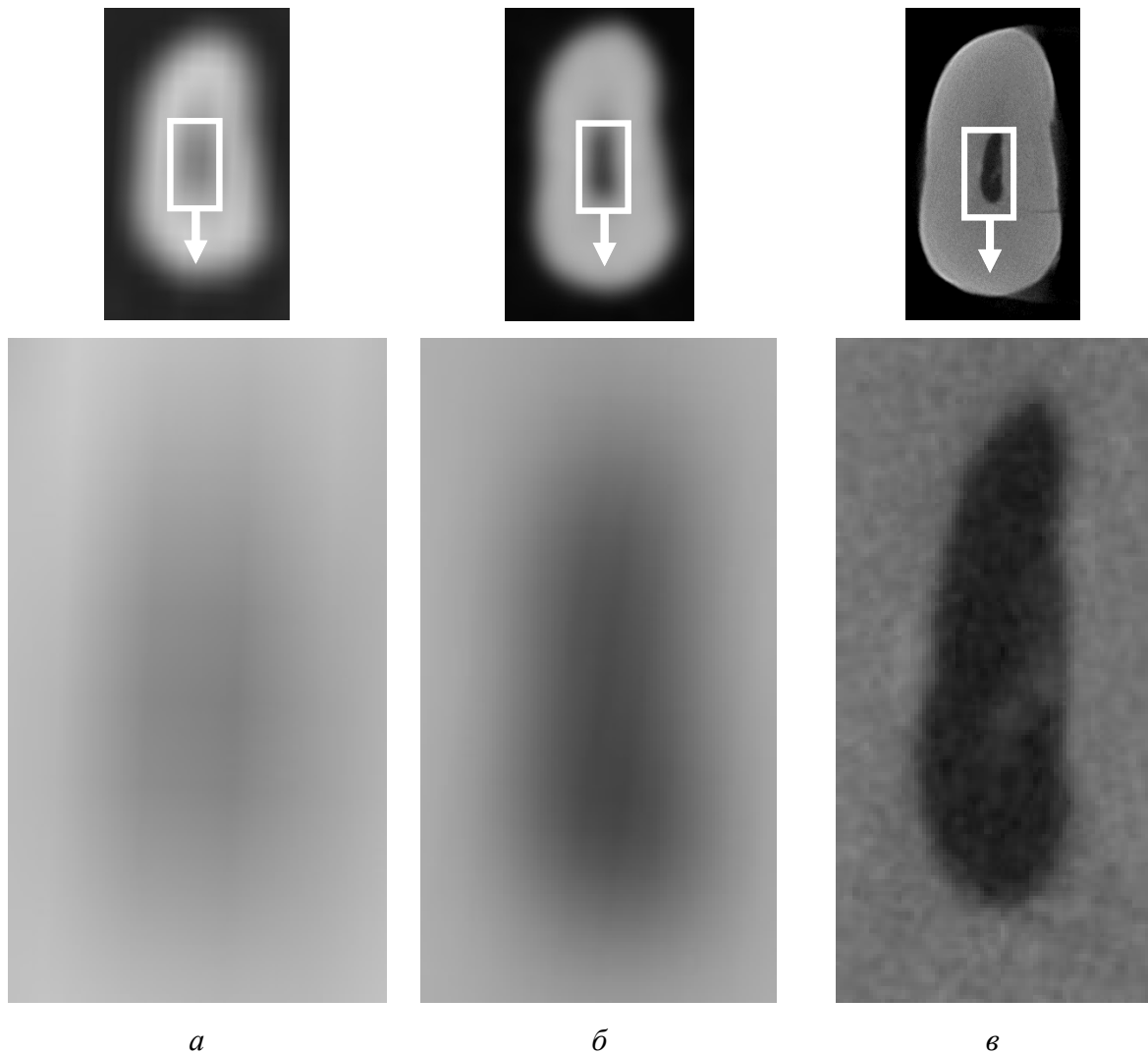


Рис. 23. Изображения средней части корня удаленного зуба в аксиальной плоскости: *а*, *б* – МСК-томограмма и КЛК-томограмма. Содержимое в корневом канале не наблюдается; *в* – микроКЛК-томограмма. В корневом канале слабовыраженная структура с нечеткими контурами, плотностью несколько меньше дентина

Некоторые микроКЛКТ-томограммы также дополнительно выявляли внутри корневых каналов структуры низкой плотности, имевшие неправильную форму, неоднородные точечные или протяженные обызвествления, что соответствовало пульпе, сохранившейся в корневых каналах после удаления зубов (рис. 24, а – в).

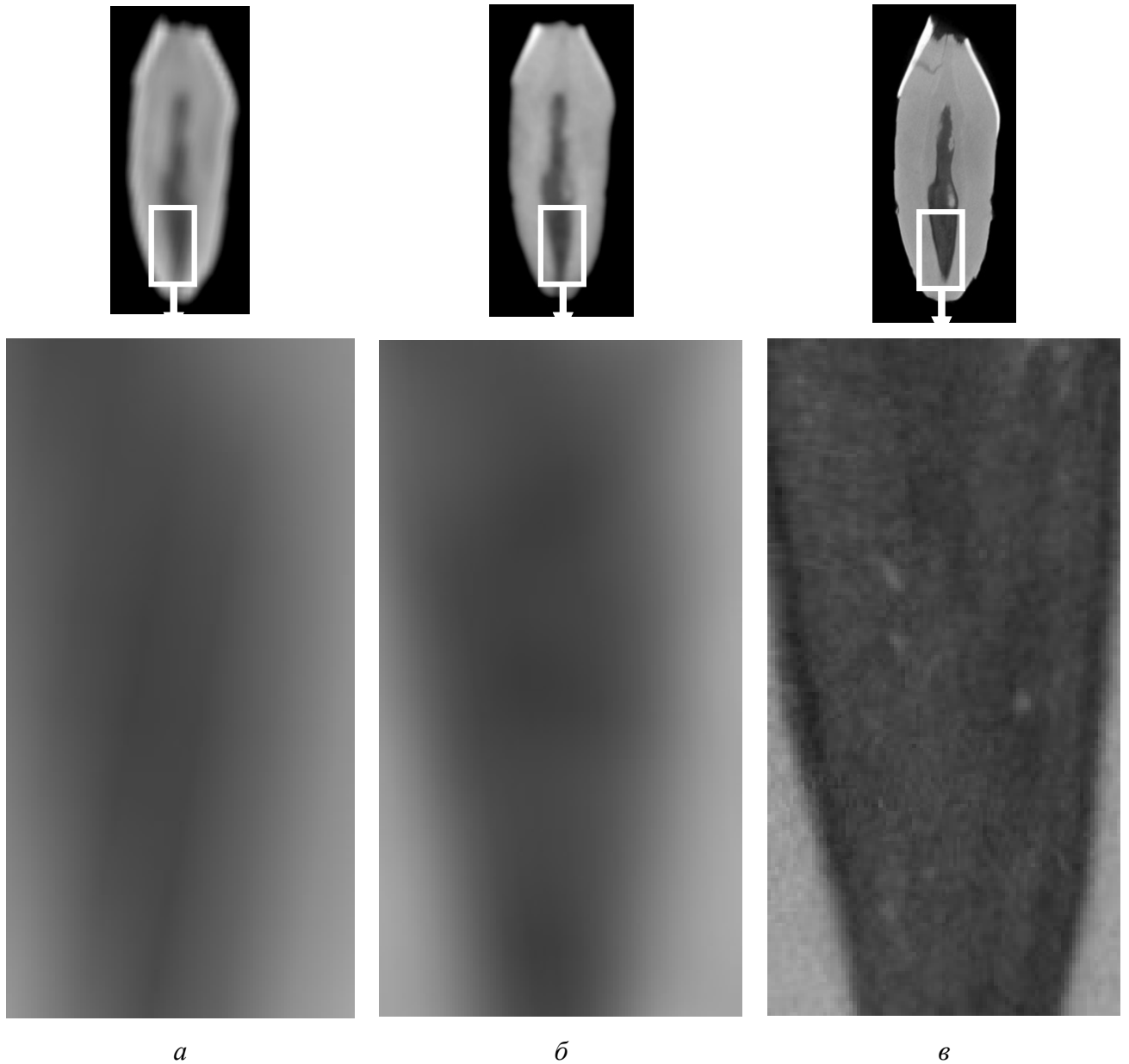


Рис. 24. Фрагменты изображений средней части корня удаленного зуба в продольной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Содержимое в корневом канале не наблюдается; *б* – КЛК-томограмма. Неоднородно распределенные оттенки серого в проекции корневого канала могут соответствовать плотным структурам или шумам на изображении; *в* – микроКЛК-томограмма. В корневом канале неоднородное содержимое плотностью ниже дентина, со множественными плотными точечными включениями

Таким образом, использование микроКЛКТ позволило выявить включения различной плотности, формы и размеров, незаметные на КЛК- и МСК-томограммах (рис. 25).

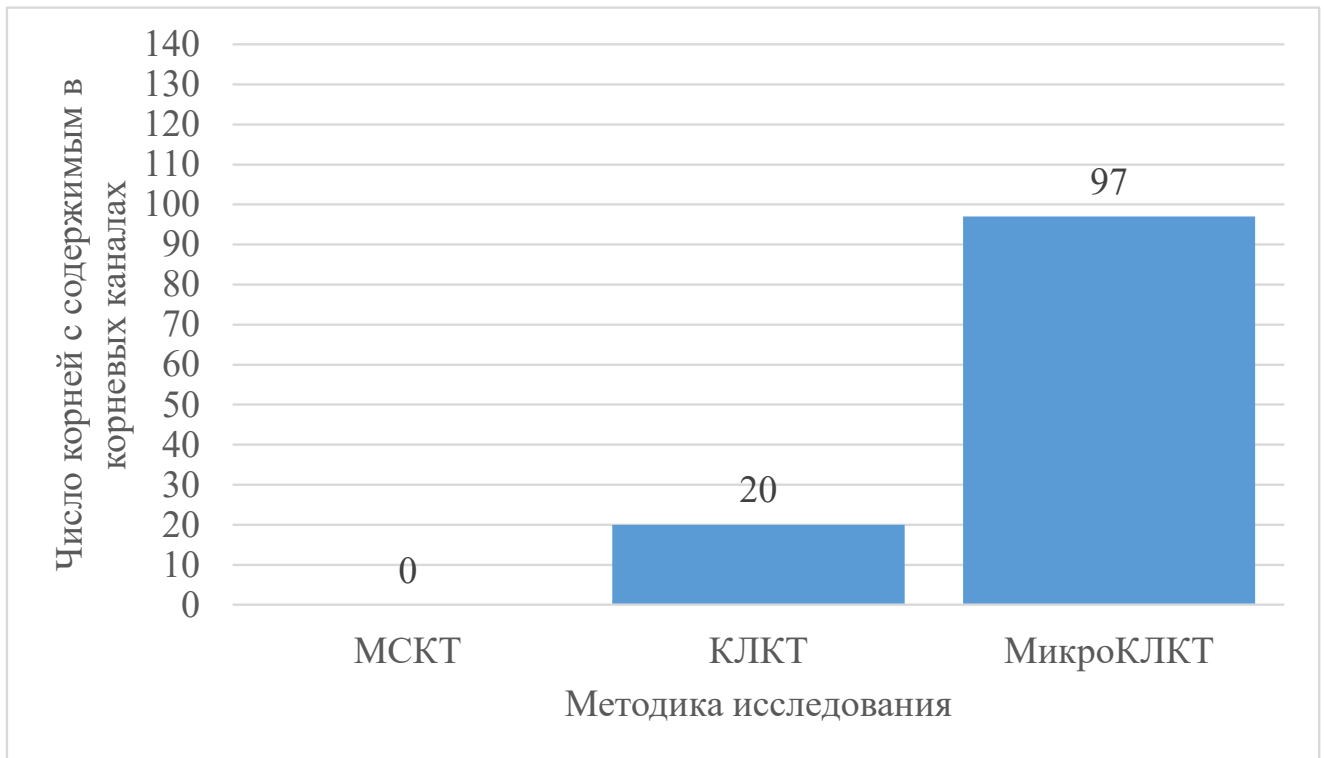


Рис. 25. Диаграмма числа корней, в которых обнаруживалось содержимое в корневых каналах, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

3.1.6. Линии перелома корней зубов

В ходе подготовки препаратов к исследованию зубы подвергались травмирующему воздействию внешней силы в момент удаления. Затем препараты хранились в высушенном состоянии, что придало хрупкость дентину и привело к формированию множества линий полных и неполных переломов в корнях зубов. В ходе анализа результатов 3 видов компьютерной томографии был произведен подсчет корней, в которых продольные переломы достигали полости корневых каналов. На МСК-томограммах они были обнаружены только в 1,5% ($n = 2$) случаев, в то время как по данным КЛКТ количество линий перелома было выше и составило 21,3% ($n = 29$) случаев. При анализе микроКЛКТ-томограмм было выявлено максимальное количество информации, что составило 42,6% ($n = 58$) от числа всех корней (рис. 26, а – и).

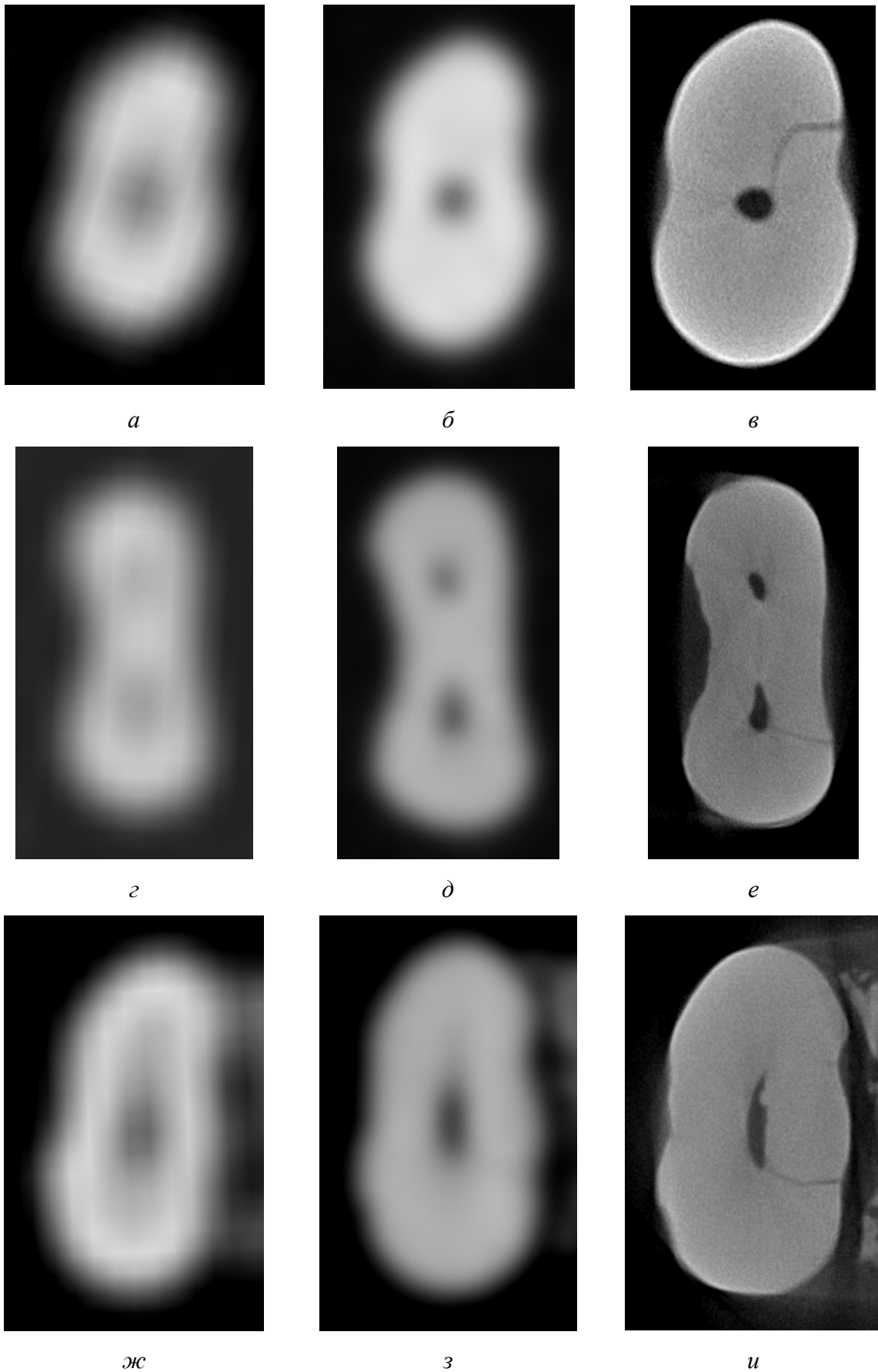


Рис. 26. Изображения средней части корней удаленных зубов в аксиальной плоскости: *а, г, ж* – МСК-томограммы; *б, д, з* – КЛК-томограммы. Линии перелома не определяются; *в, е, и* – микроКЛК-томограммы. Линии перелома достигают полости корневых каналов

На мультипланарных реконструкциях по данным микроКЛКТ, кроме переломов, сообщающихся с полостью корневого канала, можно было наблюдать большое количество невидимых на МСК-томограммах и КЛК-томограммах линий перелома различной протяженности, которые не достигали корневых каналов, пересекали корни в продольном, поперечном и косом направлениях, могли иметь изогнутую форму, сливаться и раздваиваться.

Таким образом, информативность микроКЛКТ при обнаружении линий перелома корней была выше, чем по результатам КЛКТ и МСКТ (рис. 27).

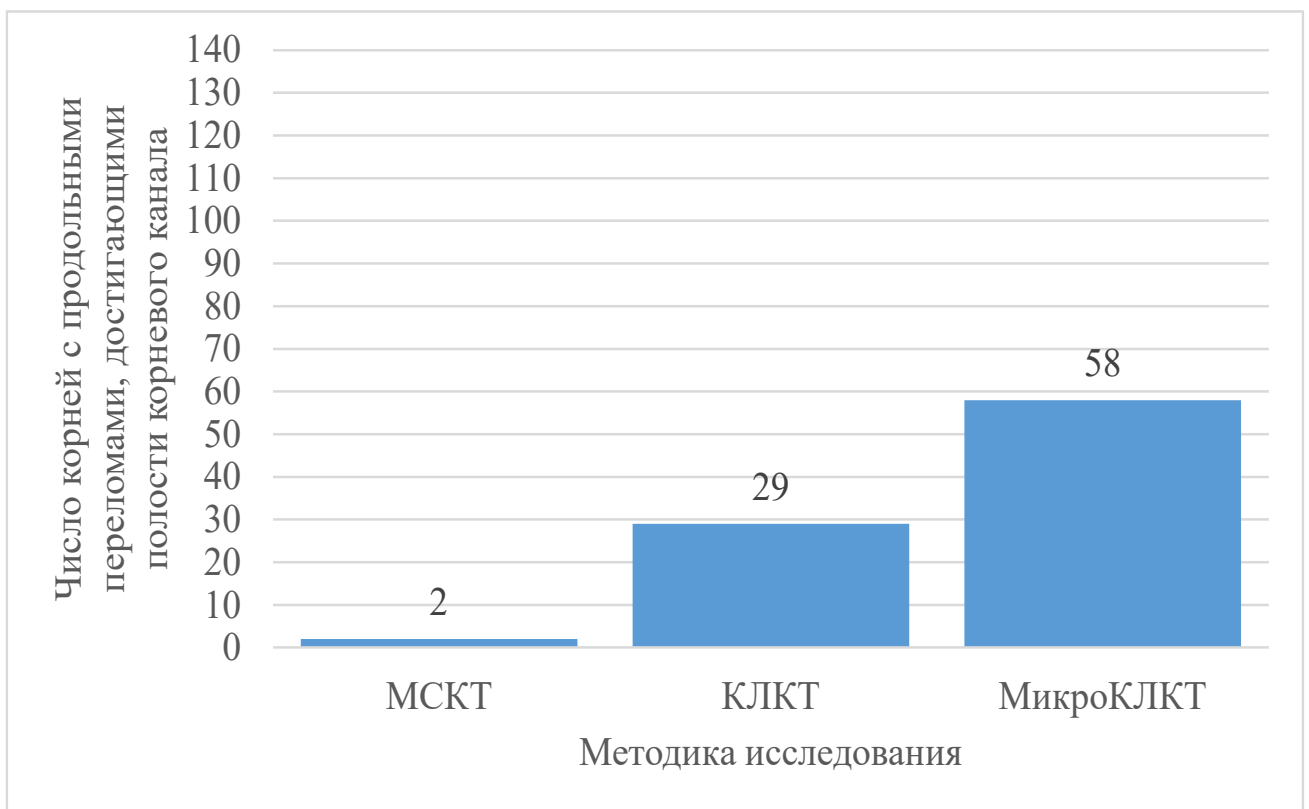


Рис. 27. Диаграмма числа корней, в которых обнаруживались продольные линии перелома, достигавшие полости корневого канала, по данным МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ

Можно обобщить заключение об информативности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ при исследовании корней удаленных зубов до эндодонтического лечения по 6 параметрам (табл. 9).

Количество корней удаленных зубов до лечения, в которых обнаруживались различные особенности по данным разных методик компьютерной томографии

Особенность строения корневых каналов	Количество корней по данным компьютерной томографии					
	МСКТ		КЛКТ		МикроКЛКТ	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
Количество корней с дополнительными каналами в апексе, которые заканчивались апикальными отверстиями	0	0	24	17,6	58	42,6
Количество корней, в которых каналы разделялись на несколько близких по диаметру каналов в апикальной части корня	1	0,7	11	8,1	25	18,4
Количество корней с дополнительными корневыми каналами, которые заканчивались отверстиями на поверхности зуба не в апикальной области корня	0	0	10	7,3	14	10,3
Количество корней, в которых дополнительные каналы формируют анастомозы между основными каналами	0	0	7	5,1	18	13,2
Количество корней, в каналах которых было обнаружено содержимое	0	0	20	14,7	97	71,3
Количество корней, в которых обнаруживались продольные линии перелома, сообщавшиеся с полостью корневого канала	2	1,5	29	21,3	58	42,6

Как видно из результатов исследования, МСКТ позволяет обнаруживать особенности строения корневых каналов и твердых тканей корня в единичных случаях. КЛКТ занимает среднее положение по информативности. Для 5 из 6 изученных выше параметров с помощью микроКЛКТ данные характеристики визуализировались как минимум в 2 раза чаще, чем при использовании КЛКТ. Очевидно, что высокая информативность микроКЛКТ выражено превосходит МСКТ и КЛКТ.

Значимость различий в информативности использованных методик компьютерной томографии по каждому из 6 критериев была подтверждена в ходе статистического анализа с использованием критерия Вилкоксона для непараметрических данных. При сравнении числа дополнительных каналов учитывалось не только их наличие, но и количество в каждом корне. По результатам сравнительного анализа между данными КЛКТ и МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ по 6 критериям во всех случаях получалось значение $p < 0,05$, что подтверждало статистическую значимость различий.

Таким образом, было доказано, что при исследовании корней удаленных зубов до лечения КЛКТ информативнее МСКТ, а микроКЛКТ информативнее КЛКТ и МСКТ.

3.2. Рентгенологическая характеристика структуры эндодонтических материалов и металлических объектов в корневых каналах препаратов удаленных зубов после лечения

На втором этапе диссертационного исследования проводился сравнительный анализ томограмм по данным КЛКТ и микроКЛКТ 109 эндодонтически пролеченных корней 71 удаленного зуба и наблюдалась рентгенологическая характеристика каждого из использованных стоматологических материалов по данным микроКЛКТ. Сканирование препаратов зубов после эндодонтического лечения с использованием МСКТ не использовалось по причине низкой информативности МСКТ по сравнению с КЛКТ и микроКЛКТ на первом этапе.

3.2.1. Кальций-алюмосиликатный цемент

С использованием кальций-алюмосиликатного цемента было пролечено 20 корней препаратов удаленных зубов.

На КЛКТ-томограммах структура кальций-алюмосиликатного цемента выглядела однородной. Его плотность визуально превышала плотность дентина. Материал не вызывал выраженных артефактов, но контуры его были нечеткими.

Полости в корневых каналах, заполненных кальций-алюмосиликатным цементом, обнаруживались только в случае крупных участков неоднородного пломбирования (рис. 28, а).

На микроКЛК-томограммах было хорошо видно, что кальций-алюмосиликатный цемент имел зернистую структуру со множеством микроскопических включений. Точечные элементы в составе кальций-алюмосиликатного цемента были визуальны сопоставимы по плотности с эмалью зубов, располагались хаотично, могли образовывать конгломераты. На некоторых изображениях, полученных с помощью микроКЛКТ, каждое из таких точечных включений вызывало собственные линейные артефакты, протяженность которых была соизмерима с микроскопическими размерами данного плотного элемента (рис. 28, б).

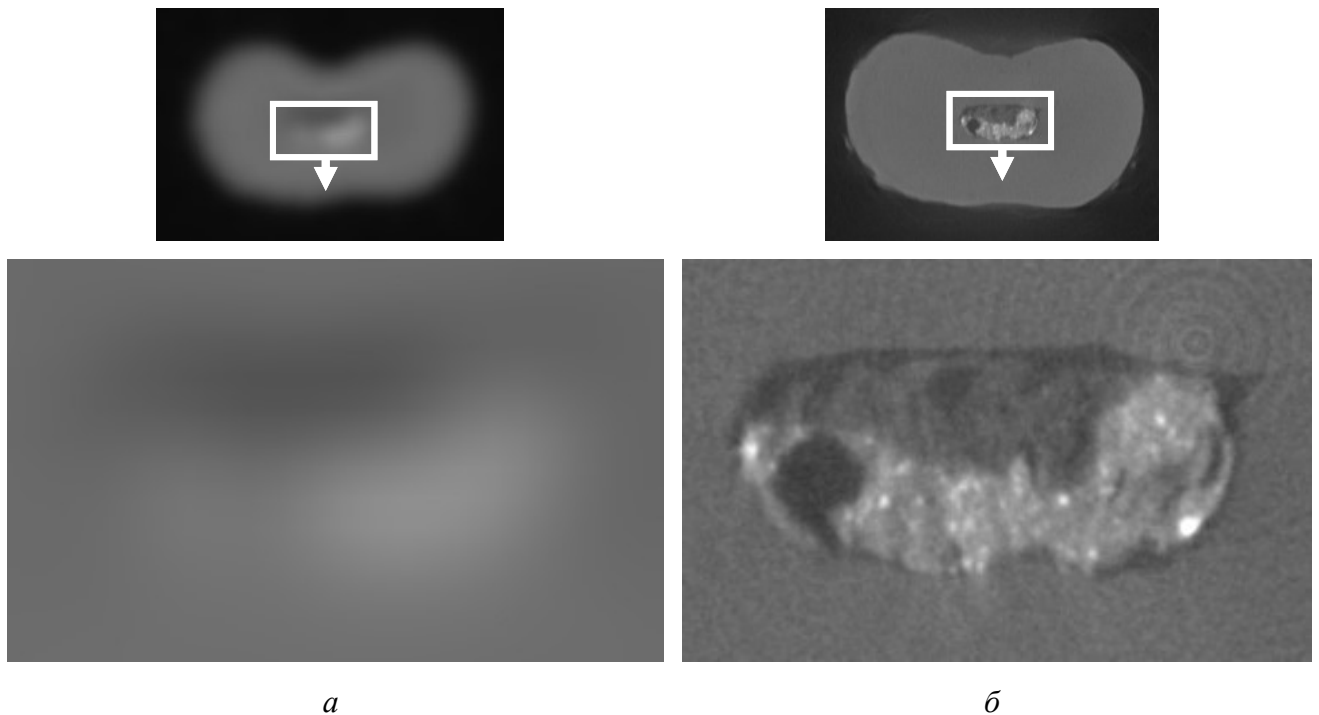


Рис. 28. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного кальций-алюмосиликатным цементом, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Пломбировочный материал однородный, очертания размытые, корневой канал заполнен цементом наполовину; *б* – микроКЛК-томограмма. Неоднородная зернистая структура пломбировочного материала содержит точечные включения высокой плотности и пустоты различной формы и размеров. Корневой канал наполовину заполнен фрагментами дентина

Можно предположить, что высокая плотность и нечеткие очертания пломбировочного материала, наблюдавшиеся на изображениях КЛКТ, формировались в основном за счет множества рентгеноконтрастных микроскопических включений, которые удалось обнаружить при помощи микроКЛКТ. На микроКЛКТ-томограммах слабые артефакты от плотных элементов в составе цемента не искажали изображение структур, контактирующих с пломбировочным материалом (рис. 29, а, б).

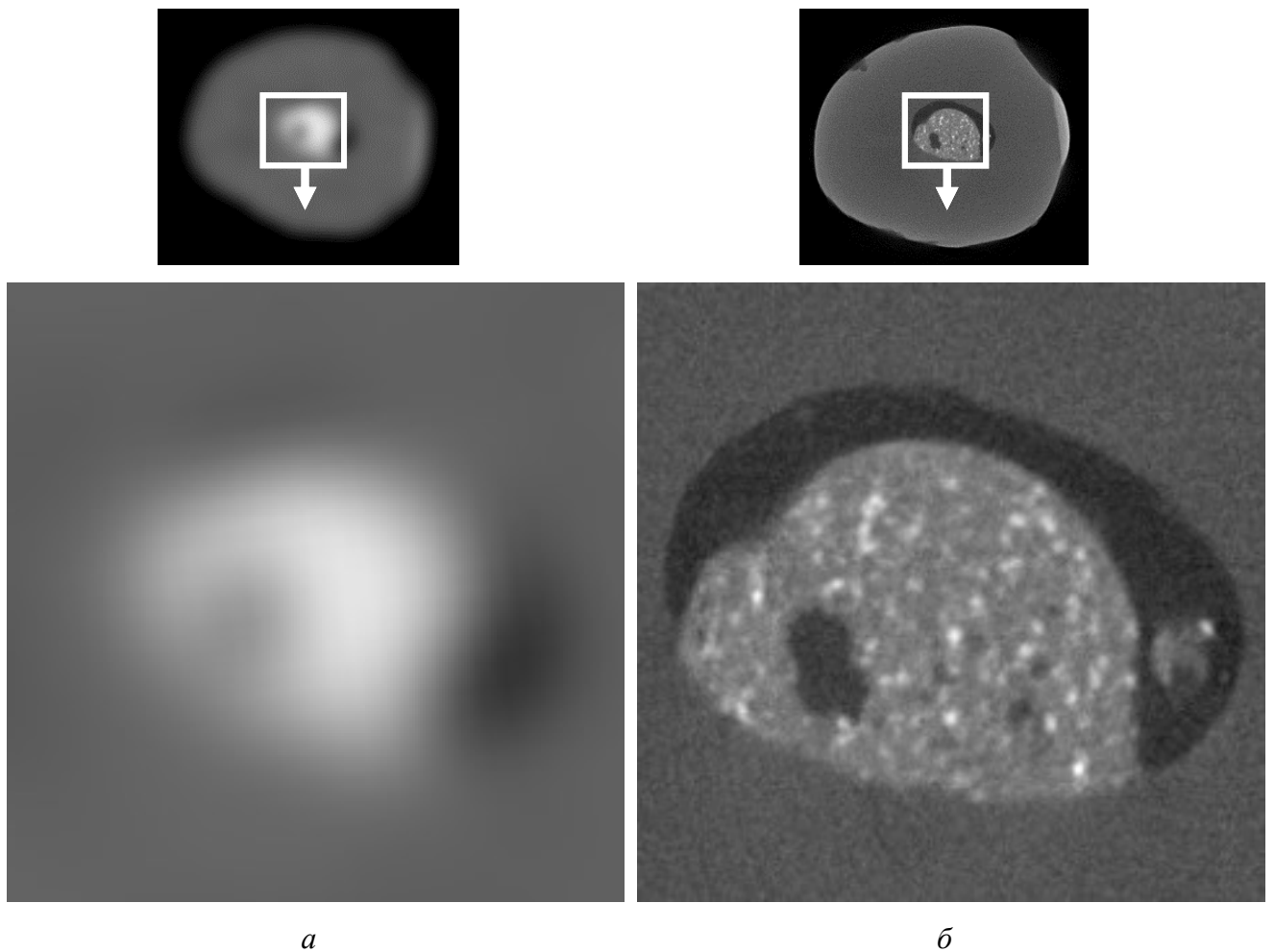


Рис. 29. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного кальций-алюмосиликатным цементом, в аксиальной плоскости: *а* – КЛКТ-томограмма. Пломбировочный материал однородный, с размытыми очертаниями, канал заполнен не полностью, в толще материала крупная полость; *б* – микроКЛКТ-томограмма. Структура пломбировочного материала зернистая, со множеством плотных включений, содержит крупную полость и несколько мелких пустот в глубине материала

По данным микроКЛКТ-томограмм обнаруживалась дополнительная информация о наличии дефектов пломбирования. Во всех пролеченных корневых

каналах при помощи микроКЛКТ визуализировалась не только крупные дефекты пломбирования, но также и неравномерно расположенные микроскопические пустоты внутри вещества цемента и на границе его контакта со стенками корневого канала (рис. 30, а, б).

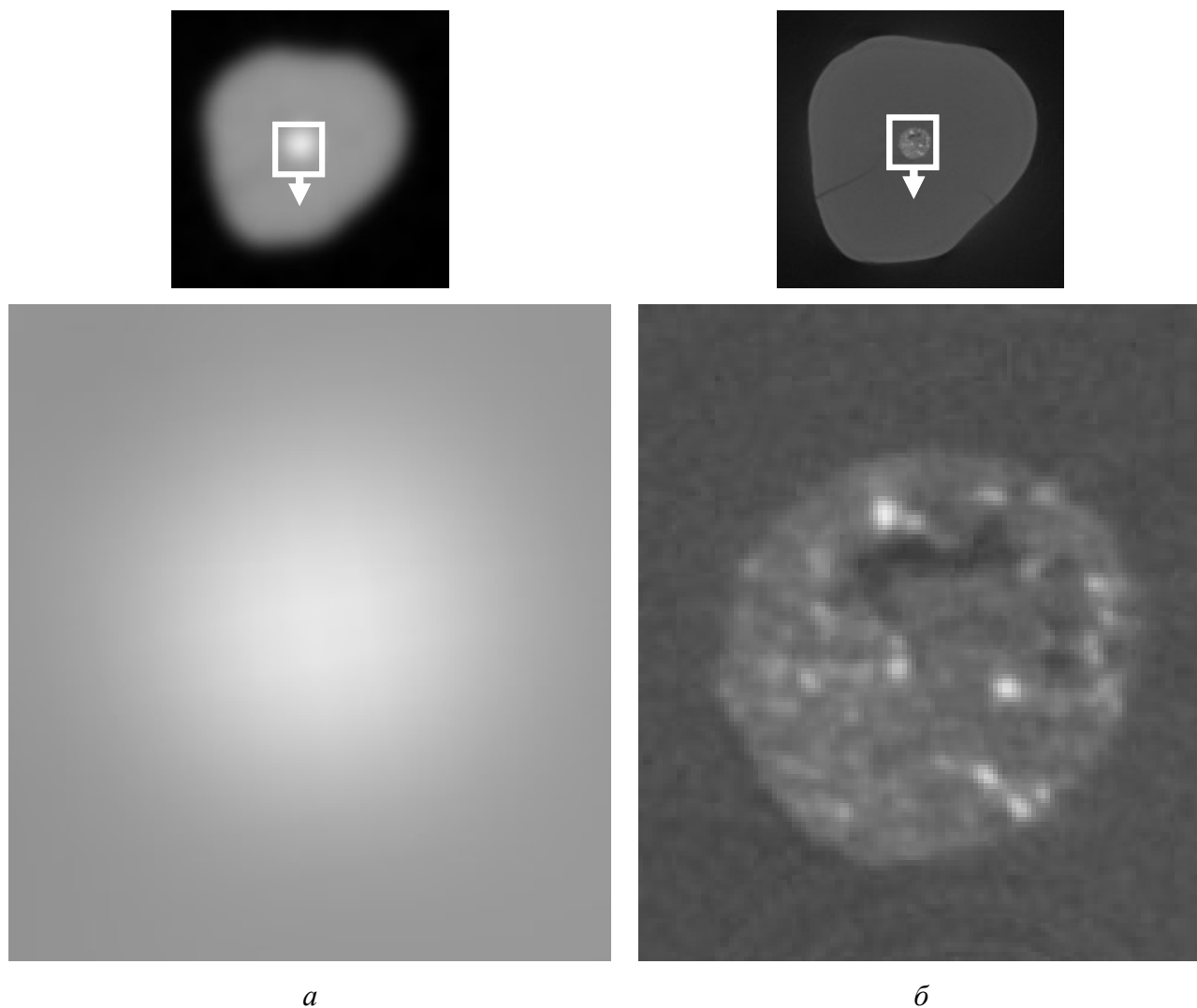


Рис. 30. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного кальций-алюмосиликатным цементом, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Пломбировочный материал однородный, его очертания размытые; *б* – микроКЛК-томограмма. Структура пломбировочного материала зернистая, с большим количеством плотных точечных включений, пустоты различной формы и размеров в толще материала, на границе цемента и дентина участок неплотного контакта

Предположительно пустоты формировались в результате недостаточно равномерного размешивания порошка с водой на этапе приготовления пасты, а также при пломбировании каналов цементом, который постепенно терял свою

пластичность по мере испарения влаги во время заполнения корневых каналов. Кроме того, по данным микроКЛКТ в толще затвердевшего в корневых каналах кальций-алюмосиликатного цемента обнаруживались линейные трещины (рис. 31, а, б).

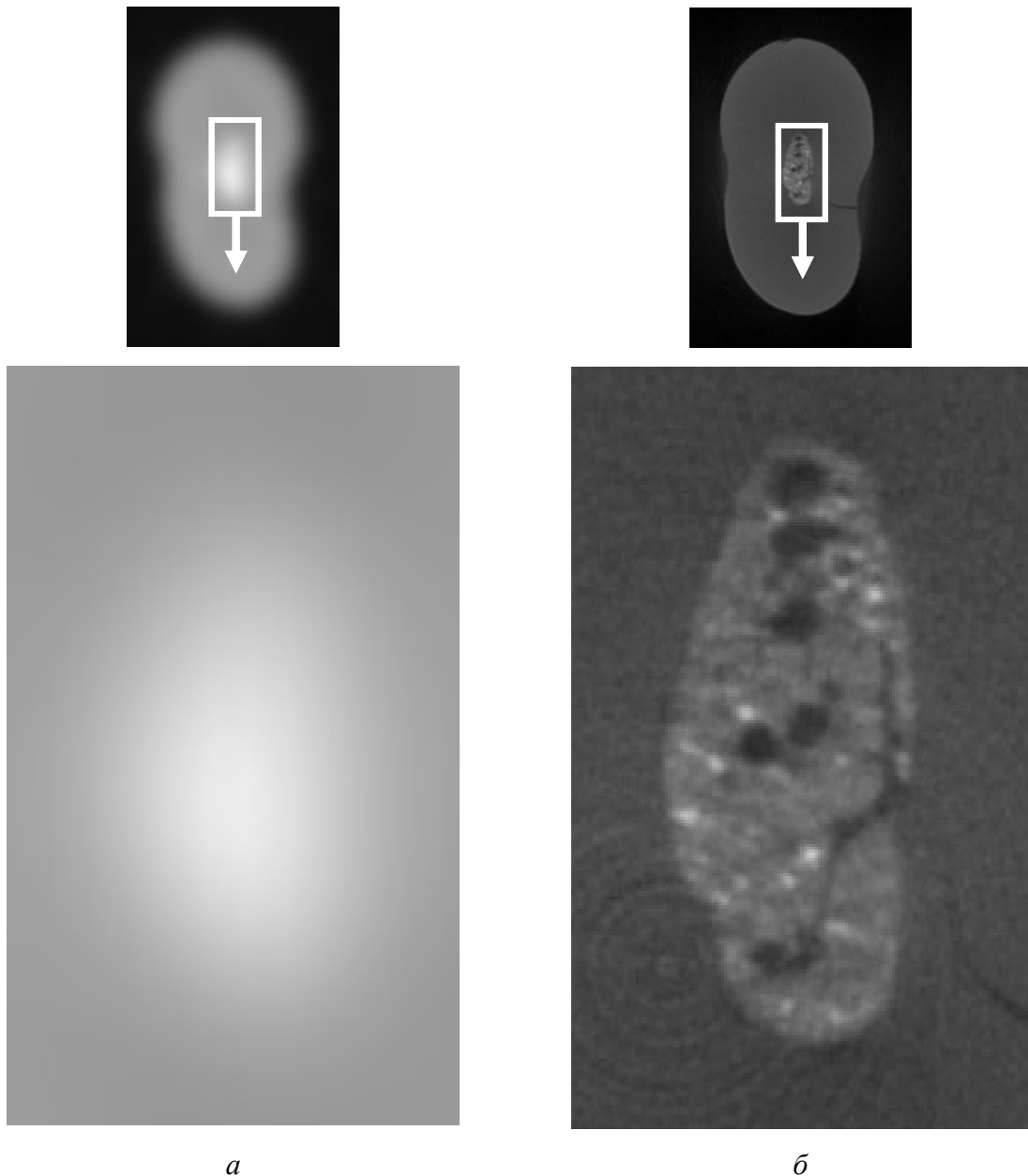


Рис. 31. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного кальций-алюмосиликатным цементом, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Пломбировочный материал однородный, очертания размытые; *б* – микроКЛК-томограмма. Зернистая структура эндодонтического материала, несколько пустот различной формы и размеров, линейная трещина

3.2.2. Стандартные гуттаперчевые штифты для метода латеральной конденсации холодной гуттаперчи в сочетании с цинкоксидэвгенольным силером

Методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи в сочетании с цинкоксидэвгенольным силером было пролечено 30 корней препаратов удаленных зубов.

На КЛК-томограммах корней зубов, пролеченных методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи, отдельные гуттаперчевые штифты не различались, если несколько из них располагались близко друг к другу в одном корневом канале. Силер не определялся. Плотное содержимое корневых каналов вызывало артефакты, по причине которых очертания пломбировочных материалов и прилежащих структур выглядели размытыми и скрывали неплотное пломбирование корневых каналов (рис 32, а; 33, а; 34, а; 35, а).

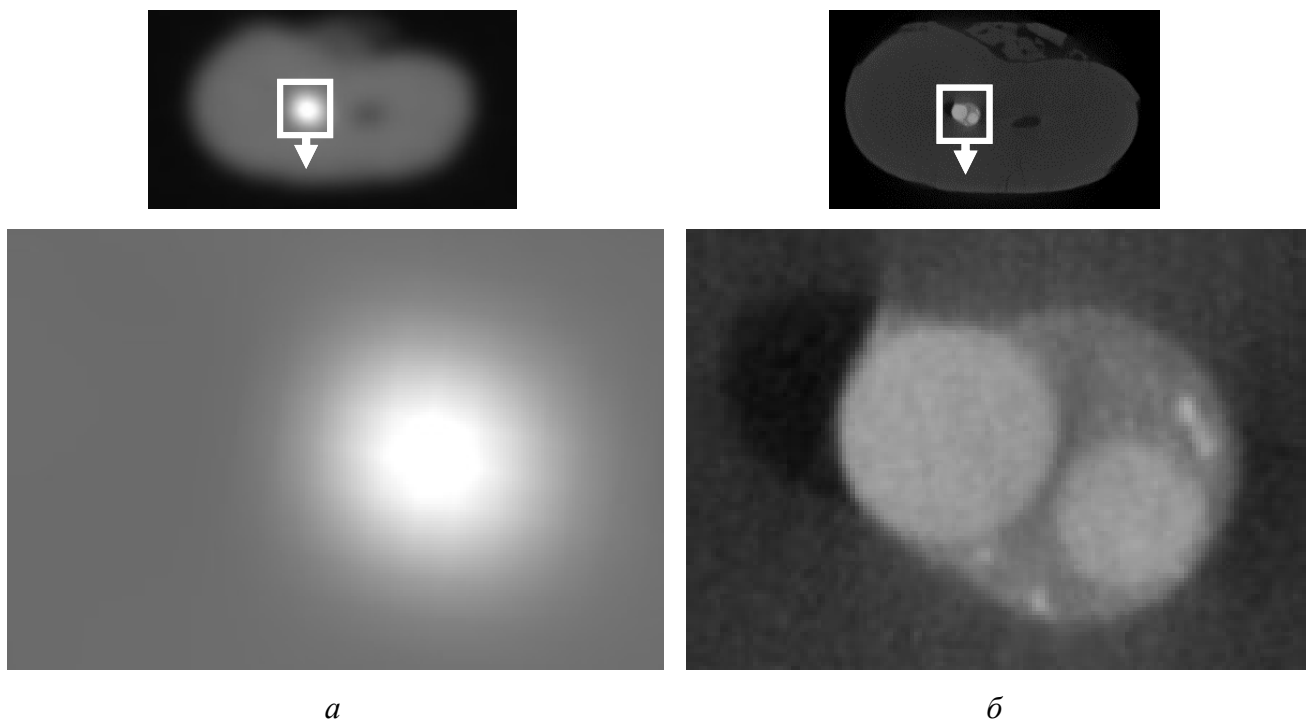


Рис. 32. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкоксидэвгенольным силером, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Пломбировочный материал однородный, очертания размытые, граница между гуттаперчевыми штифтами и силером не видна, неизвестно количество штифтов в канале; *б* – микроКЛК-томограмма. Корневой канал заполнен не полностью, очертания двух гуттаперчевых штифтов четкие. Силер содержит плотные включения

На микроКЛК-томограммах гуттаперчевые штифты разного диаметра выделялись вне зависимости от их взаимного положения и количества в корневых каналах. Только в плотно запломбированных каналах очертания штифтов могли сливаться воедино в результате сдавления, особенно в апикальной части, где диаметр штифтов уменьшался (рис 32, б).

Рядом с гуттаперчевыми штифтами высокой плотности на микроКЛК-томограммах наблюдался цинкоксидэвгенольный силер в корневых каналах. Плотность силера была визуально выше дентина и ниже гуттаперчи, структура – однородная, содержала небольшое количество хаотично расположенных высокоплотных точечных включений. Артефакты от штифтов и плотных включений в составе силера были выражены слабо и не затрудняли визуализацию структур, вплотную прилежавших к поверхности этих материалов (рис. 33, б).

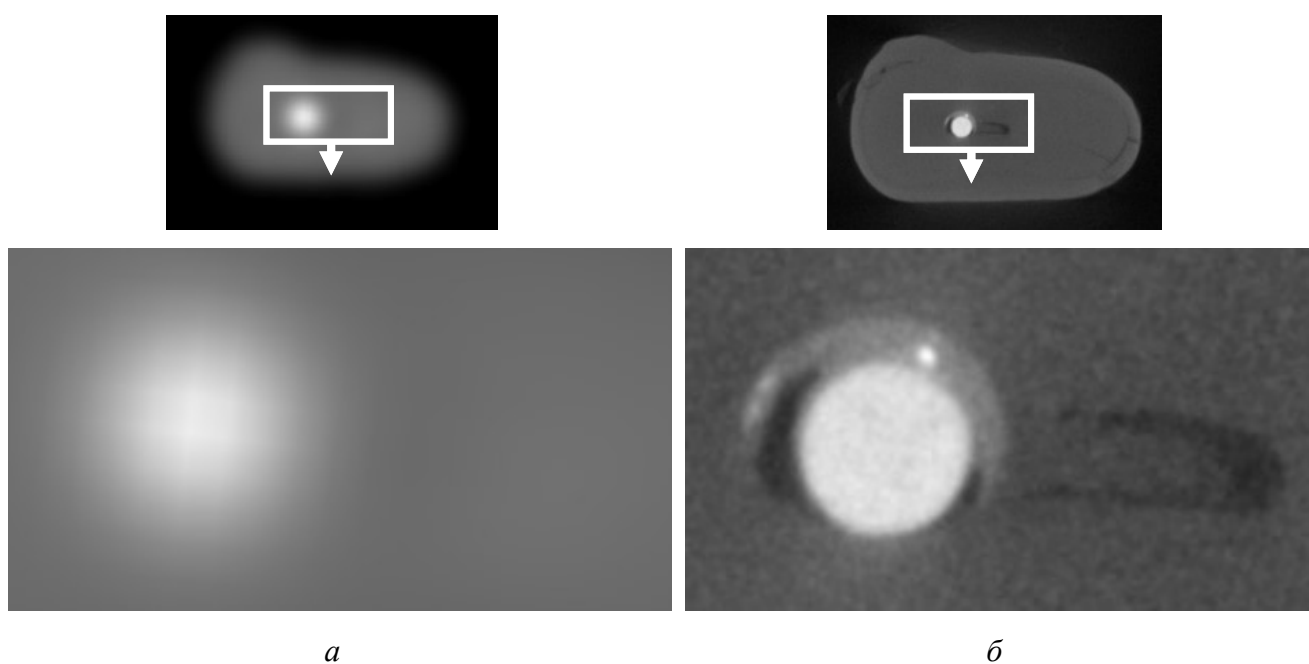


Рис. 33. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкоксидэвгенольным силером, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Содержимое корневого канала однородное, с размытыми очертаниями; *б* – микроКЛК-томограмма. Один гуттаперчевый штифт, силер с несколькими плотными точечными включениями, промежуток между штифтом, силером и дентином. Щелевидный корневой канал содержит фрагменты дентина

Внутри вещества гуттаперчевых штифтов при помощи микроКЛКТ обнаруживались единичные точечные полости, а также встречались скопления

множества микроскопических пустот вдоль продольной оси в центре штифтов, за счет чего создавалась картина наподобие полых сердцевин (рис. 34, б).

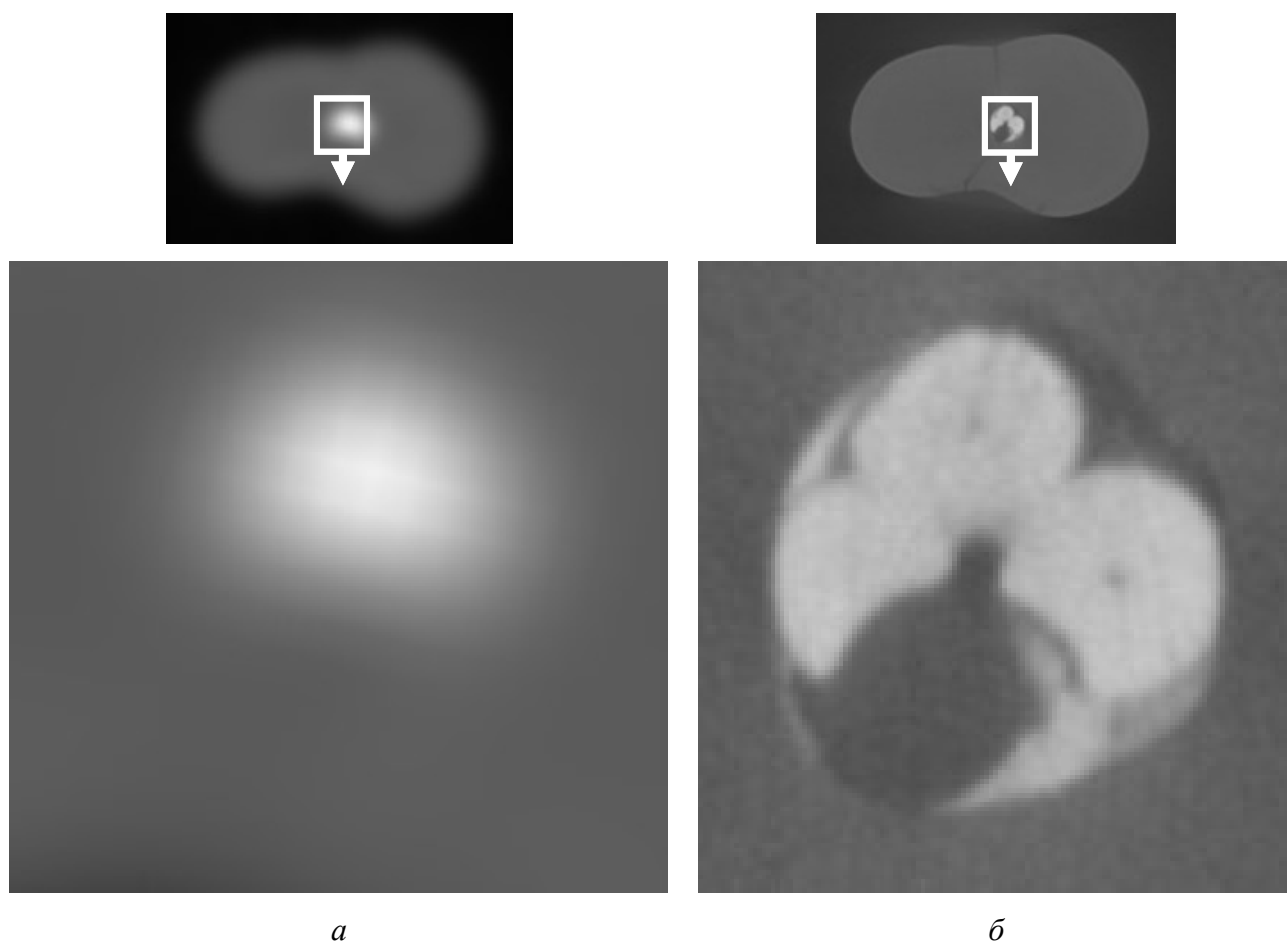


Рис. 34. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкоксидаэвгенольным силером, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Содержимое корневого канала однородное, с размытыми очертаниями; *б* – микроКЛК-томограмма. Гуттаперчевые штифты деформированы после сдавления спредером. Микроскопические пустоты наподобие полых сердцевин в центральной части штифтов

На микроКЛК-томограммах можно было проследить, как отдельные штифты перекручивались и изгибались в корневых каналах. Округлая форма штифтов в поперечном сечении могла деформироваться под воздействием внешней силы, например, при сдавлении одного штифта другим внутри корневого канала. Деформированным гуттаперчевым штифтам оказалось свойственно сохранять измененную форму после прекращения внешнего воздействия. В результате деформации формировались линии разрыва штифтов (рис. 35, б).

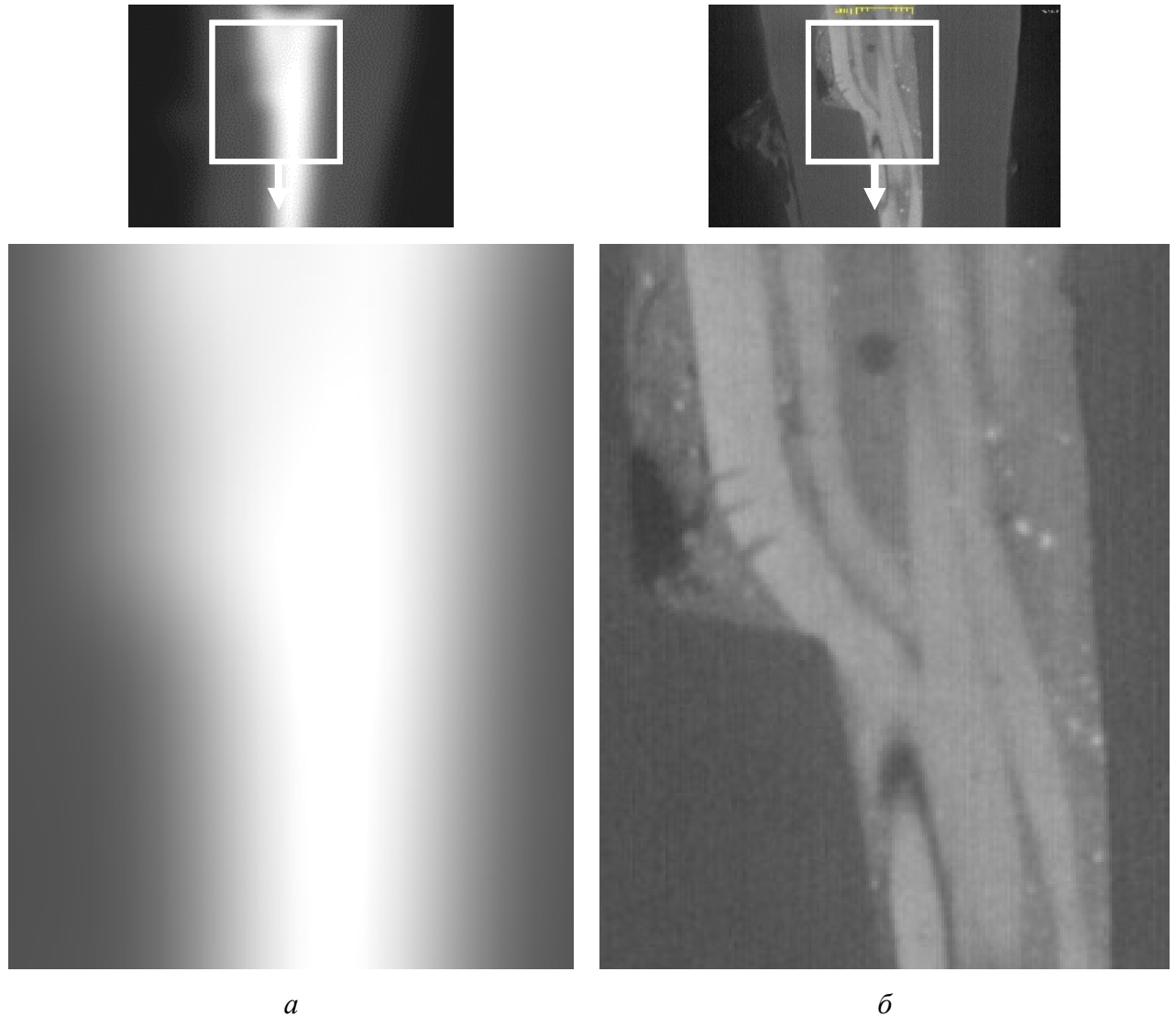


Рис. 35. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкоксидаэвгенольным силером, в продольной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Пломбировочный материал в корневом канале однородный, с размытыми очертаниями; *б* – микроКЛК-томограмма. Видны четкие очертания нескольких изогнутых штифтов и силер, поперечные линии разрыва в области изгиба гуттаперчевого штифта. Силер содержит точечные плотные включения, линейную трещину и полости разного размера и формы

3.2.3. Термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы

С использованием термопластифицированной гуттаперчи на пластиковом носителе было пролечено 14 корней препаратов удаленных зубов, из которых в 8 случаях использовался силер на основе эпоксидной смолы.

Содержимое в каналах, пролеченных термопластифицированной гуттаперчей, на КЛК-томограммах выглядело однородным, визуально достигало

плотности эмали зуба. Пластиковый носитель, гуттаперча и силер не различались. Содержимое каналов вызывало умеренно выраженные артефакты, по причине которых очертания близлежащих структур и дефекты пломбирования не определялись, за исключением крупных участков неплотного пломбирования (рис. 36, а; 37, а; 38, а).

На микроКЛК-томограммах вещество гуттаперчи было однородным, менее плотным, чем эмаль зуба. На фоне гуттаперчи хорошо различались пластиковые носители, в составе которых наблюдалось большое количество рентгеноконтрастных точечных элементов. Слабовыраженные артефакты формировались в основном в области пластиковых стержней, характеризовались низкой яркостью и протяженностью. Очертания структур, окружающих запломбированные корневые каналы, хорошо различались (рис. 36, б).

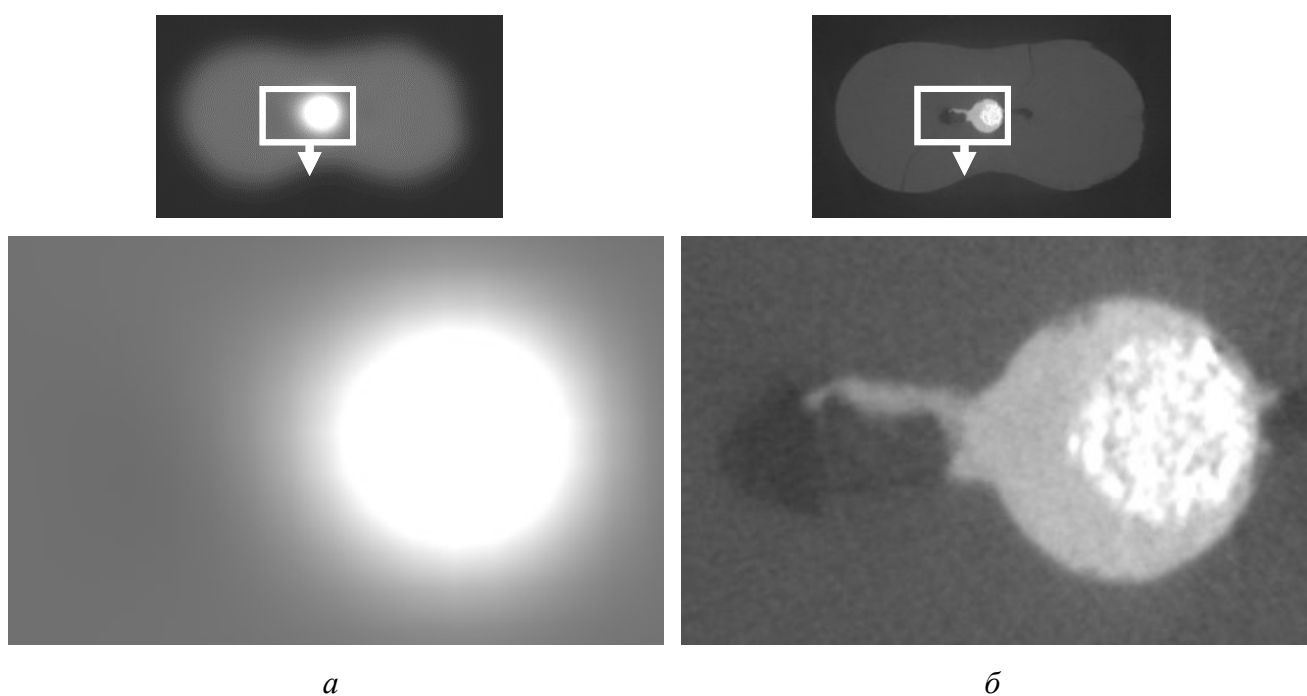


Рис. 36. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Размытый контур запломбированного корневого канала; *б* – микроКЛК-томограмма. Пластиковый носитель на фоне однородной гуттаперчи. Мелкие пустоты на границе дентина и гуттаперчи. Фрагменты дентина после механической обработки в щелевидном корневом канале. Силер отличается более низкой плотностью по сравнению с гуттаперчей, распространяется вдоль фрагментов дентина в щелевидной части канала

По данным микроКЛКТ силер на основе эпоксидной смолы имел однородную структуру и визуально отличался от гуттаперчи только более низкой плотностью (рис. 37, б).

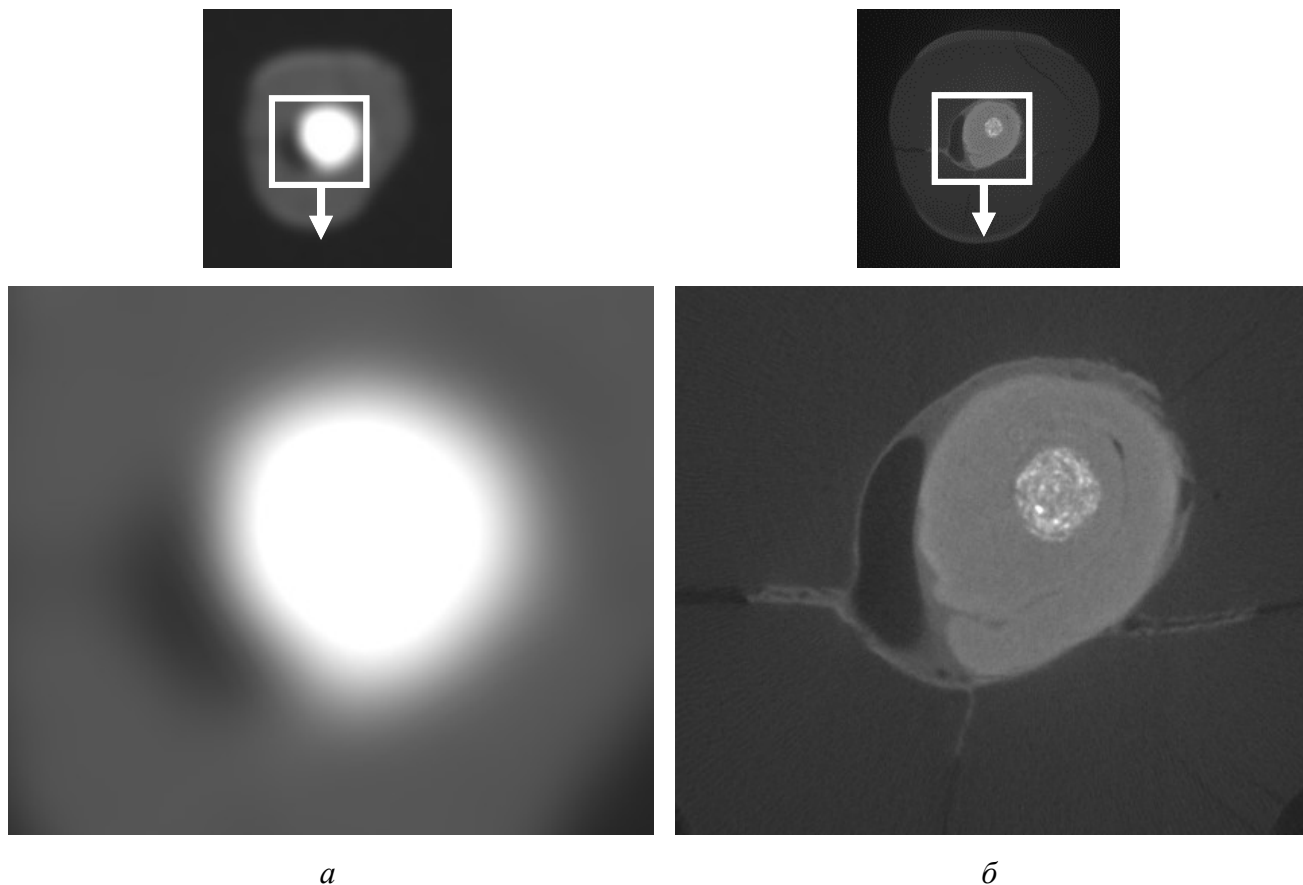


Рис. 37. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Очертания содержимого канала размыты, крупная полость в неплотно запломбированном канале; *б* – микроКЛК-томограмма. Пластиковый носитель со множеством плотных включений. Слои гуттаперчи в форме спирали после введения obturатора в корневой канал вращательным движением. Силер между гуттаперчей и дентином распространяется вдоль линий перелома корня зуба

Слой силера между гуттаперчей и дентином на некоторых изображениях не удавалось различить. При изучении мультипланарной реконструкции без дополнительных сведений о содержимом корневого канала не всегда можно было сказать, относился ли данный препарат к группе, пролеченной с использованием силера или без него (рис. 38, б). Для определения содержимого таких корневых

каналов требовалось внимательно рассматривать серии реконструкций в разных проекциях.

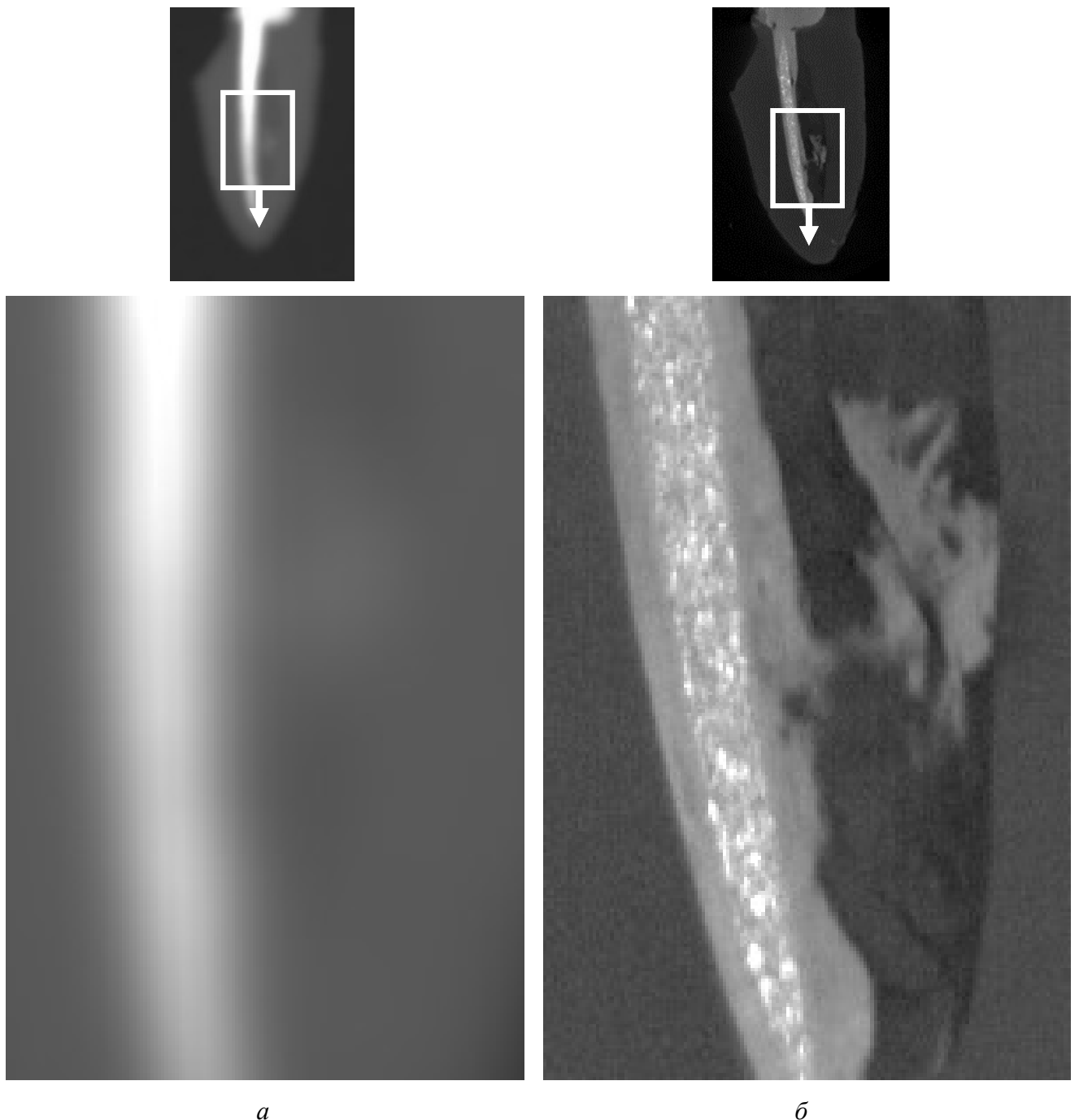


Рис. 38. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе в сочетании с силером на основе эпоксидной смолы, в продольной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Очертания содержимого корневого канала размытые, структура пломбировочного материала однородная; *б* – микроКЛК-томограмма. Щелевидный корневой канал наполовину заполнен фрагментами дентина. Пломбировочный материал неравномерно распространяется между фрагментами дентина. Силер и гуттаперча не различимы

На микроКЛК-томограммах можно определялся неплотный контакт между гуттаперчей, силером и дентином даже при микроскопических размерах полости. Термопластифицированная гуттаперча могла содержать единичные точечные пустоты, а также отслаиваться от пластикового носителя на небольшом протяжении (рис. 39 а, б).

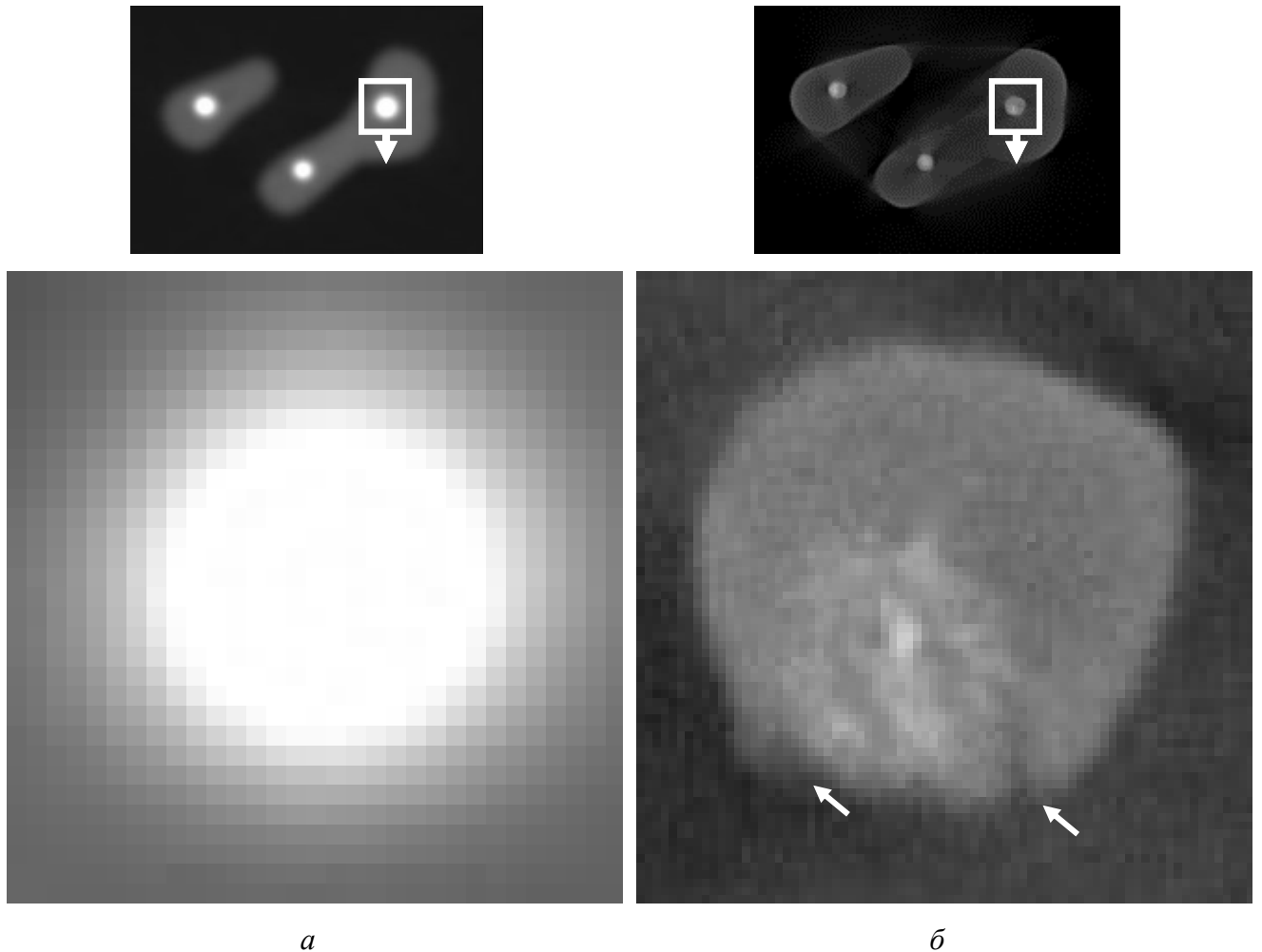


Рис. 39. Фрагменты изображений средней части корня зуба, пролеченного термопластифицированной гуттаперчей на пластиковом носителе без силера, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Очертания содержимого канала размытые, гуттаперча и носитель не различаются; *б* – микроКЛК-томограмма. Пластиковый носитель с плотными включениями. Гуттаперча отслаивается от носителя в результате введения obturатора вплотную к стенке корневого канала (*стрелки*)

По результатам микроКЛКТ были обобщены рентгеносемиотические признаки эндодонтических материалов. Для каждого материала характерно уникальное сочетание признаков (табл. 10).

Рентгеносемиотические признаки эндодонтических материалов по данным микроКЛКТ

Эндодонт. материал	Рентгеносемиотические признаки			
	Распределение в корн. канале	Плотность	Характер включений	Наличие полостей
Кальцийалюмосиликатный цемент	Паста, принимает форму корневого канала	Выше дентина	Множество хаотично расположенных точечных включений высокой плотности, могут формировать конгломераты	Множество полостей разных размеров и формы, включая микроскопические
Гуттаперчевые штифты	Гибкие конические штифты, деформируются под действием внешней силы, сохраняют деформацию после прекращения воздействия	Сопоставима с плотностью эмали	Включения отсутствуют	Единичные точечные полости. Скопления микроскопических пустот в области продольной оси в центре штифта. Разрывы штифта в месте изгиба
Цинкоксидэвгенольный силер	Паста, принимает форму корневого канала	Выше дентина, меньше гуттаперчевых штифтов	Небольшое число хаотично расположенных плотных точечных включений	Полости различного размера и формы, включая микроскопические
Термопластифицированная гуттаперча на пластиковом носителе	Пластичная структура после нагрева, принимает форму корневого канала	Сопоставима с плотностью эмали	Пластиковый носитель содержит множество рентгеноконтрастных элементов	Единичные микроскопические полости. Отделение гуттаперчи от носителя на небольшом протяжении
Силер на основе эпоксидной смолы	Паста, принимает форму корневого канала	Выше дентина, ниже термопластифицированной гуттаперчи	Включения отсутствуют	Единичные полости различного размера и формы, включая микроскопические

3.2.4. Фрагменты металлических инструментов в корневых каналах

В ходе эндодонтической обработки удаленных зубов в некоторых корневых каналах были преднамеренно сломаны металлические инструменты. После этого 9 и 10 корней пролечили кальций-алюмосиликатным цементом и методом

латеральной конденсации холодной гуттаперчи соответственно. Остальные 26 корней не подвергались дальнейшей обработке и содержали только фрагменты металла. Всего было изучено 45 корней зубов, в каналах которых находились сломанные инструменты.

В каналах, содержащих вместе со сломанным инструментом кальций-алюмосиликатный цемент, при помощи КЛКТ всегда удавалось обнаружить металлический фрагмент на фоне эндодонтического материала. При этом видимость металла на фоне цемента и видимость цемента вблизи металла зависели от направления плоскости мультипланарной реконструкции, а также контрастности и яркости изображений (рис. 40, а).

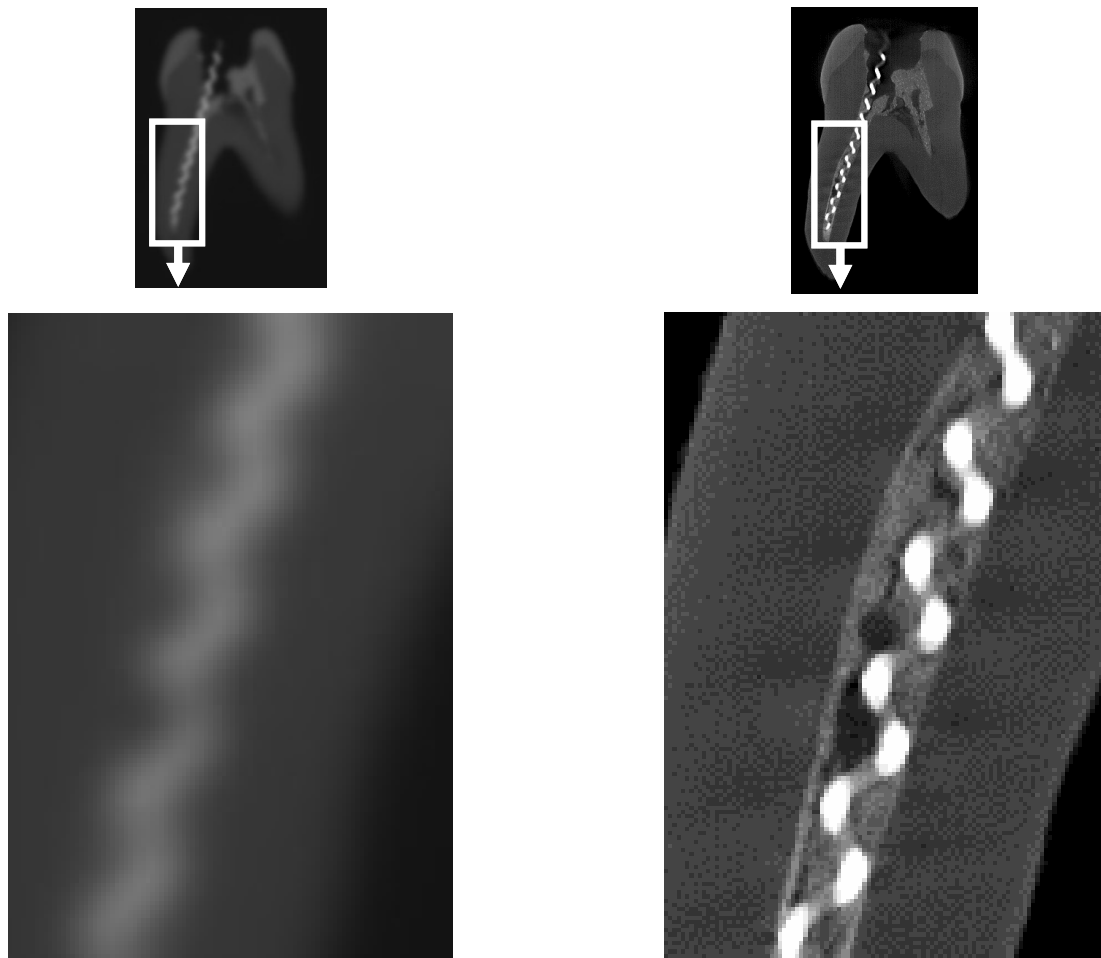


Рис. 40. Фрагменты изображений средней части корня зуба с обломком металлического инструмента в корневом канале, пролеченном кальций-алюмосиликатным цементом, в продольной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Спиральный фрагмент инструмента в корневом канале, пломбировочный материал не определяется; *б* – микроКЛК-томограмма. Спиральный фрагмент инструмента и цемент с точечными включениями в корневом канале. Зернистая структура цемента плохо различима вблизи металла

В корневых каналах, содержащих сломанные инструменты и гуттаперчевые штифты с цинкоксидаэвгенольным силером, по данным КЛКТ невозможно было обнаружить металлический объект (рис. 41, а).

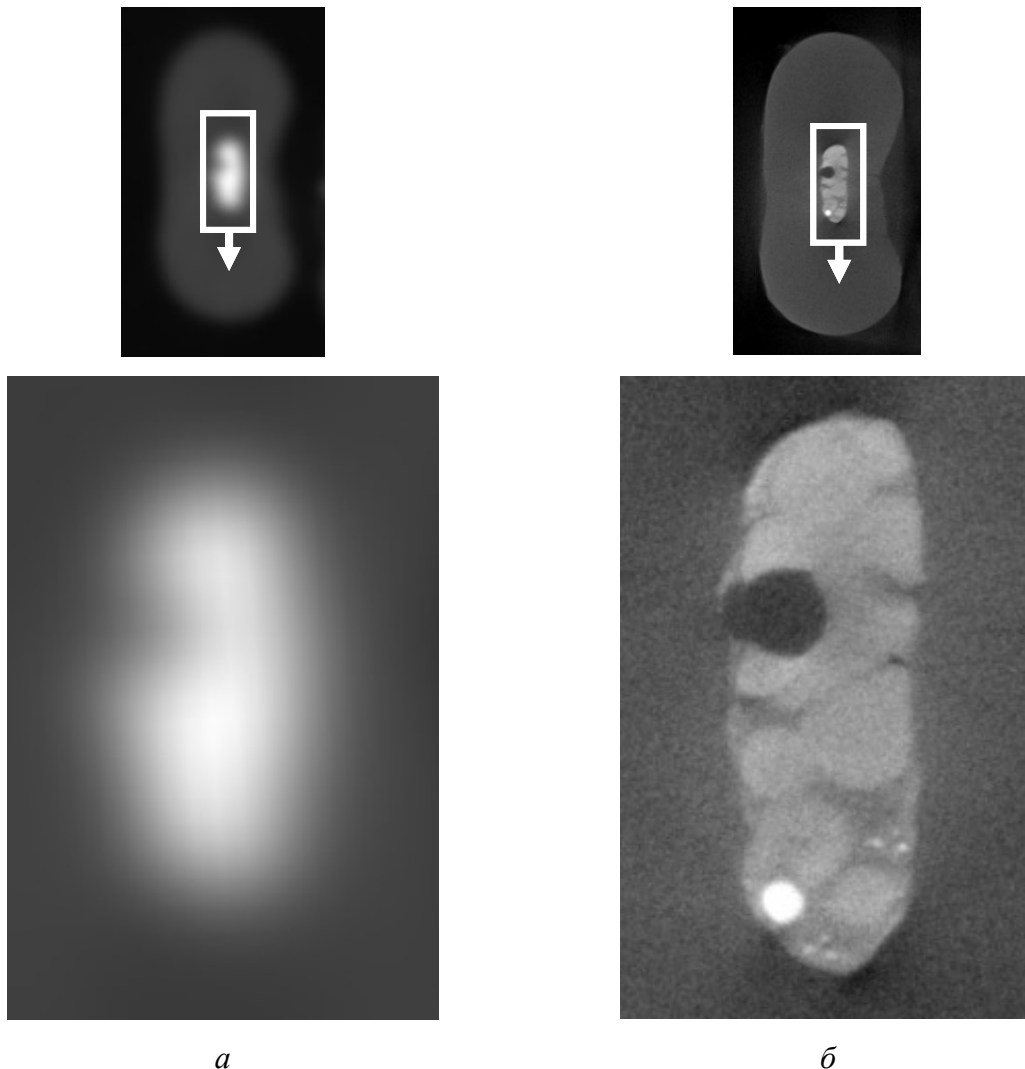


Рис. 41. Фрагменты изображений средней части корня зуба с обломком металлического инструмента в корневом канале, пролеченном методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкоксидаэвгенольным силером, в аксиальной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Структура содержимого корневого канала однородная, с размытыми очертаниями; *б* – микроКЛК-томограмма. Гуттаперчевые штифты, силер и металлический объект в корневом канале

В зависимости от контрастности, яркости и направления плоскости двумерного изображения содержимое запломбированного корневого канала на КЛК-томограммах сливалось воедино либо металлические инструменты выглядели так же, как гуттаперчевые штифты (рис. 42, а).

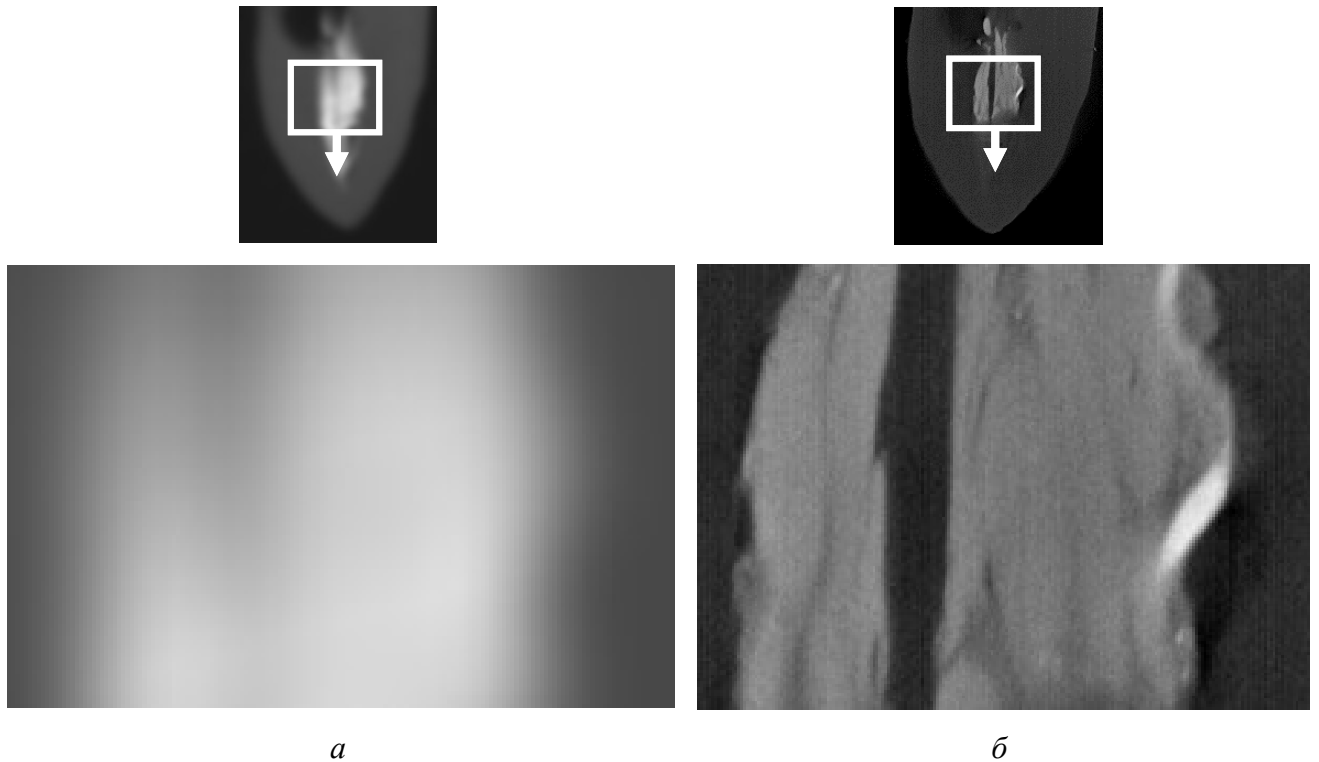


Рис. 42. Фрагменты изображений средней части корня зуба с обломком металлического инструмента в корневом канале, пролеченном методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи с цинкооксидэвгенольным силером, в продольной плоскости: *а* – КЛК-томограмма. Очертания гуттаперчевых штифтов сливаются; *б* – микроКЛК-томограмма. Корневой канал содержит гуттаперчевые штифты и фрагмент металлического инструмента спиральной формы

Металлические фрагменты на двухмерных КЛКТ-реконструкциях всегда имели размытые очертания и округлую форму в поперечном сечении. Прилежащие к инструментам мелкие объекты были скрыты от наблюдения из-за артефактов от металла (рис. 43, а – в).

На микроКЛК-томограммах фрагменты сломанных металлических инструментов обнаруживались вне зависимости от наличия эндодонтических материалов (рис. 40, б; рис. 41, б; рис. 42, б), имели четкие контуры и различную форму в поперечном сечении – округлую, треугольную, квадратную (рис. 43, г – е). Артефакты от металла затрудняли визуализацию только микроскопических или низкоплотных структур вблизи поверхности инструментов (см. рис. 40, б). Дополнительные объекты в канале, такие, как фрагменты дентина или пломбировочные материалы, можно обнаруживались даже на фоне артефактов (см. рис. 43, д, е).

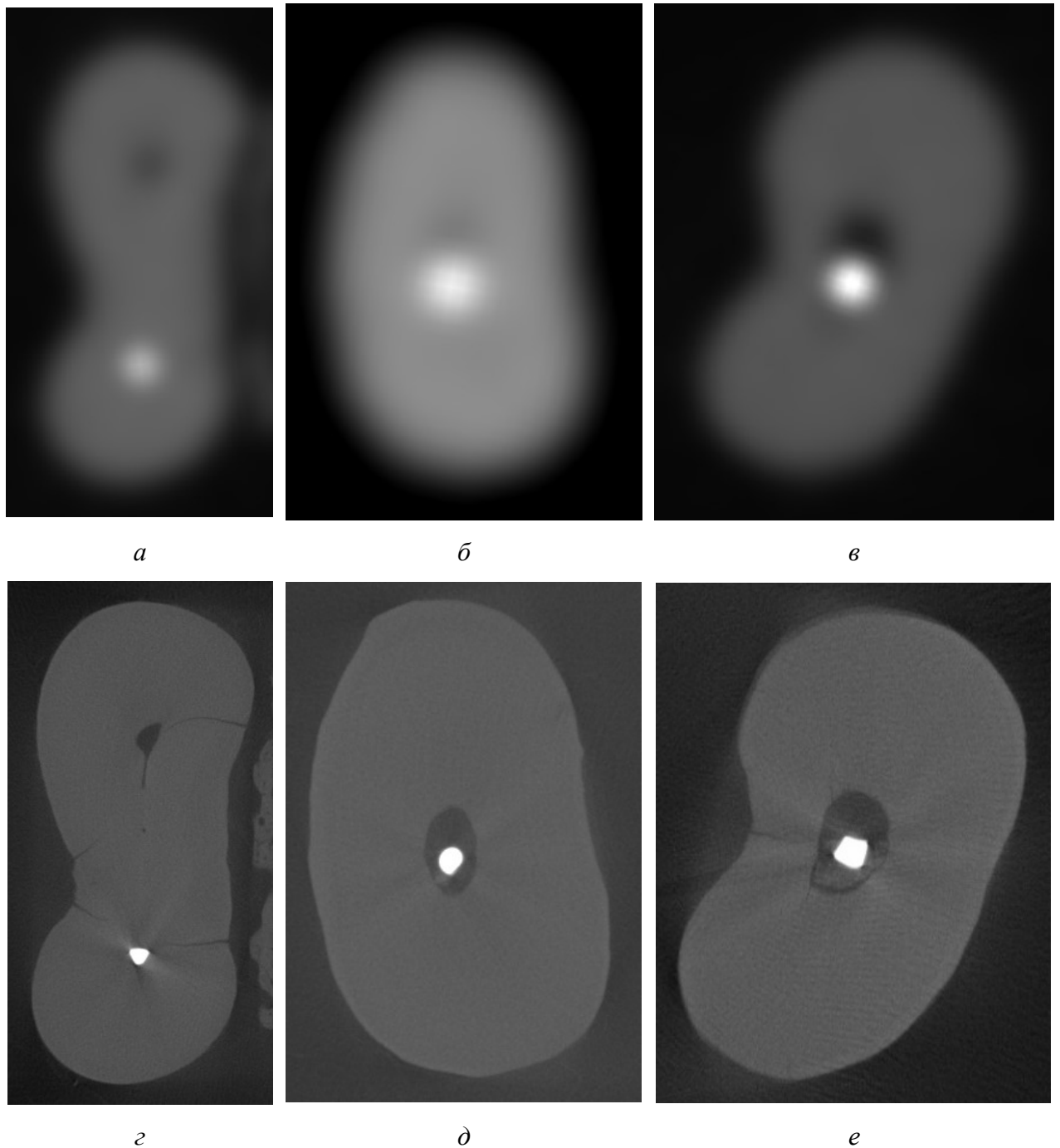


Рис. 43. Изображения средней части корней зубов с обломками металлических инструментов в корневом канале, в аксиальной плоскости: *a – в* – КЛК-томограммы. Контуры металлических фрагментов нечеткие, имеют округлую форму в поперечном сечении; *г – е* – микроКЛК-томограммы. Контуры металлических фрагментов четкие, формы в поперечном сечении треугольная (*г*), округлая (*д*) и четырехугольная (*е*). На фоне артефактов фрагменты дентина по соседству с поверхностью инструментов в полости каналов (*д, е*), линии переломов в дентине за пределами каналов (*г, е*)

Для построения трехмерных моделей фрагментов инструментов могло использоваться любое программное обеспечение, совместимое с данными в форматах DICOM и TIFF. В ходе исследования использовалась некоммерческая

программа с открытым кодом 3D Slicer, способная к работе с мультипланарными и трехмерными реконструкциями. При построении трехмерных моделей использовалась функция Threshold инструмента Segment editor в сочетании с кистью для правки мелких деталей и ножницами для удаления лишнего объема. Для измерений размеров построенных моделей применялись инструменты Ruler и Quantification (рис. 44).

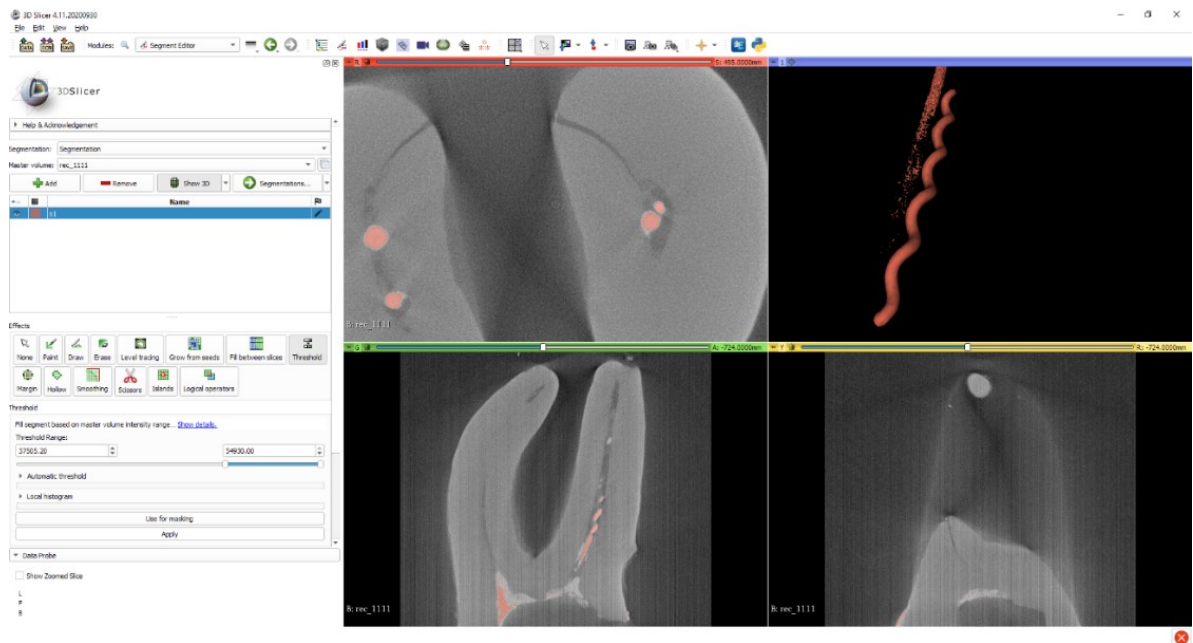


Рис. 44. Построение трехмерной реконструкции фрагмента металла по данным микроКЛКТ в программе 3D Slicer

Создание трехмерных реконструкций сломанных инструментов и измерение их размеров по данным КЛКТ было затруднено, по причине нечетких очертаний металлических обломков, что не позволяло точно определить точки для отсчета и указать границы объектов для построения объемных моделей. По данным КЛКТ зубов, содержавших металлические фрагменты и гуттаперчевые штифты, построить трехмерные реконструкции металла оказалось невозможно, так как сломанные инструменты на фоне штифтов не выделялись.

Изображениям по данным микроКЛКТ были свойственны четкость и высокое пространственное разрешение, поэтому выполнить измерение размеров

инструментов и построение трехмерных моделей по результатам микроКЛКТ удалось во всех случаях.

Трехмерные реконструкции сломанных инструментов по данным КЛКТ характеризовались сглаженным рельефом поверхности, в то время как результаты микроКЛКТ позволяли построить модели, которые близко повторяли форму инструмента и обладали сложным рельефом поверхности. Кроме того, по данным КЛКТ визуально наблюдалось увеличение размеров трехмерных моделей фрагментов металла по сравнению с моделями, построенными по данным микроКЛКТ (рис. 45, а, б).

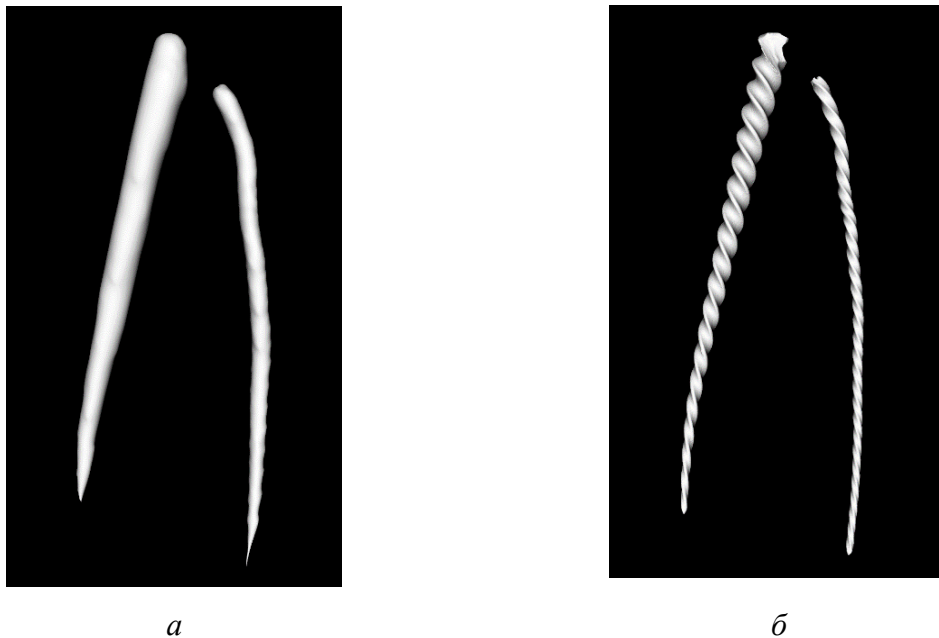


Рис. 45. Трехмерные реконструкции обломков металлических инструментов в корневых каналах удаленного зуба: *а* – КЛКТ. Рельеф поверхности моделей сглажен, спиральная форма инструментов не определяется, объем визуально увеличен по сравнению с моделями микроКЛКТ; *б* – микроКЛКТ. Детали на поверхности и спиральная форма реконструкции, деформированный металл в месте поломки инструмента

После построения трехмерных реконструкций по данным КЛКТ и микроКЛКТ был произведен подсчет их длины (в мм), площади поверхности (в мм²) и объема (в мм³). Было проведено сравнение измерений сломанных инструментов внутри 9 корней, каналы которых содержали металлический обломок в сочетании с кальций-алюмосиликатным цементом, и 26 корней, содержавших только металл без пломбировочного материала (табл. 11).

Результаты измерений фрагментов сломанных металлических инструментов по данным методик КЛКТ и микроКЛКТ

№ зуба	Полож. зуба	Пломбир. материал в каналах корней	Результаты измерений фрагментов сломанных металлических инструментов							
			Виден ли металл. фрагмент на фоне пломб. материала		Длина фрагмента металла, мм		Объем металлического фрагмента, мм ³		Площадь поверхности металла, мм ²	
			КЛКТ	Микро- КЛКТ	КЛКТ	Микро- КЛКТ	КЛКТ	Микро- КЛКТ	КЛКТ	Микро- КЛКТ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	17	-	-	-	3,722	5,257	1,53516	0,329586	8,16189	5,07001
22	28	Кальций- алюмосиликатный цемент	Да	Да	12,34	14,68	2,13477	0,402351	12,8482	9,12261
23	18	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	5,880	-	0,971275	-	9,44451
25	28	-	-	-	3,806	6,6	1,22852	0,711143	7,22084	8,19078
26	17	-	-	-	3,204	5,963	1,03906	0,0556405	6,09037	1,62213
		-	-	-	3,652	4,121	1,72461	0,150416	8,93401	2,93170
27	17	Кальций- алюмосиликатный цемент	Да	Да	17,95	19,63	7,3418	0,704715	38,7949	14,8579
		-	-	-	7,337	8,47	3,50977	0,191486	17,5315	4,30662
35	46	-	-	-	14,25	15,05	7,47852	1,93276	35,3552	22,0764
		-	-	-	9,161	9,023	1,45117	0,457431	9,40912	8,19134
37	18	Кальций- алюмосиликатный цемент	Да	Да	12	10,09	6,80664	0,578636	32,5048	10,6724
		Кальций- алюмосиликатный цемент	Да	Да	3,134	2,928	1,26562	0,0991314	6,97147	2,06993

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
41	16	-	-	-	8,287	8,042	5,40625	0,700199	24,0249	9,5811
		-	-	-	7,309	7,953	3	0,706433	16,1642	9,6044
42	36	-	-	-	4,861	5,026	1,99023	0,516337	10,7773	6,16189
		-	-	-	6,327	6,952	2,16992	0,574594	12,5379	7,45606
		-	-	-	6,877	7,535	2,64648	0,819692	14,8925	9,43975
44	37	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	7,535	-	0,529102	-	8,33829
45	16	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	16,87	-	1,212	-	20,2381
47	16	-	-	-	7,183	6,732	1,45117	0,214699	9,55519	4,50021
		-	-	-	6,836	6,263	0,685547	0,118396	4,07621	3,29697
48	27	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	14,662	-	2,3206958	-	12,7619
		Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	14,044	-	1,3829	-	11,4512
		Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	16,97	-	9,70412	-	57,9869
49	36	Кальций-алюмосиликатный цемент	Да	Да	13,37	12,34	2,51172	0,30575	16,4169	7,73393
50	47	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	10,29	-	0,785472	-	14,5362
53	26	-	-	-	0,6806	0,8544	0,0644531	0,0113493	0,258544	0,577797
		-	-	-	6,454	6,144	1,10352	0,160175	7,24435	3,56681
55	25	-	-	-	1,678	3,547	0,244141	0,0507666	1,49873	1,51118
		-	-	-	10,72	11,46	4,33789	0,63036	23,3235	9,67875

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
56	36	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	27,732	-	4,80878	-	50,2199
57	36	Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	5,692	-	0,239773	-	4,45248
60	16	-	-	-	12,09	14,13	2,97656	0,662241	18,4912	11,5596
63	37	-	-	-	15,08	13,9	5,83203	0,856408	31,1644	12,5717
65	16	Кальций-алюмосиликатный цемент	Да	Да	16,68	16,08	9,34766	1,40719	42,9171	20,2487
66	17	Кальций-алюмосиликатный цемент	Да	Да	18,65	17,59	2,25586	0,502254	14,0506	11,9214
		Кальций-алюмосиликатный цемент	Да	Да	12,839	13,163	5,22852	1,30211	26,291	16,4879
68		Гуттаперчевый штифт + силер	Нет	Да	-	12,57	-	0,911775	-	14,7123
69	38	-	-	-	8,617	8,508	3,02148	0,468185	16,7912	7,6944
72	24	-	-	-	13,86	13,71	6,7832	1,64611	34,095	17,9899
		-	-	-	15,14	14,15	3,82617	0,837786	23,4498	12,9699
75	74	Кальций-алюмосиликатный цемент	Да	Да	0,818	0,6034	0,298828	0,046919	1,94348	0,824432
77	36	-	-	-	11,58	11,61	9,09766	0,976569	48,2664	17,3869
84	14	-	-	-	15,54	15,66	4,96484	4,25584	27,3421	33,4163
		-	-	-	14,19	15,35	3,02148	1,55759	19,8201	18,2831

Объем трехмерной модели одного и того же металлического фрагмента по результатам КЛКТ всегда был больше, чем у модели после реконструкции по данным микроКЛКТ, причем в 91,4 % ($n = 32$) случаев более чем в 3 раза и в 45,7% ($n = 16$) случаев более чем в 6 раз.

Площадь поверхности модели металлического фрагмента была больше по результатам КЛКТ, чем микроКЛКТ, в 88,6% ($n = 31$) случаев. В 45,7% ($n = 16$) случаев разница между площадью поверхности по данным КЛКТ и микроКЛКТ составляла более чем в 2 раза.

Длина фрагмента инструмента была больше по данным КЛКТ по сравнению с микроКЛКТ в 57,1% ($n = 20$) случаев. Для 31,4% ($n = 11$) металлических фрагментов разница в измерениях длины по результатам КЛКТ и микроКЛКТ составляла более 10% от длины фрагмента по данным обеих методик, для 71,4% ($n = 25$) – более 5%.

Очевидно, что микроКЛКТ позволила получить трехмерные модели, более близкие к реальной форме объекта. При измерениях объема и площади поверхности металлических объектов по данным КЛКТ происходили значительные искажения в сторону увеличения показателей. В ходе статистического анализа измерений с применением критерия Вилкоксона было получено значение $p < 0,05$, что подтверждало значимость различий в полученных измерениях. Достоверных закономерностей в изменении линейных измерений выявлено не было как при сравнении процентного соотношения результатов, так и при использовании критерия Вилкоксона ($p > 0,05$). По результатам 2 методик длина объекта изменялась как в меньшую, так и в большую сторону, причем разница между показаниями КЛКТ и микроКЛКТ во многих случаях достигала более 5–10% от предполагаемой реальной длины фрагмента. Для изучения зависимости линейных измерений от использованной методики рентгеновской компьютерной томографии и от истинных размеров металлического объекта требуется дополнительное исследование.

3.3. Результаты исследования препаратов нижней челюсти

В ходе экспериментального исследования были изучены 4 препарата нижней челюсти, 2 из которых содержали металлические конструкции, закрепленные на сохранившихся зубах и на поверхности кости.

На мультипланарных реконструкциях костей нижней челюсти при помощи всех 3 использованных методик компьютерной томографии можно наблюдались костные балки и основные анатомические ориентиры нижней челюсти, такие, как нижнечелюстные каналы и периодонтальные щели (рис. 46, а – в; 47, а – е).

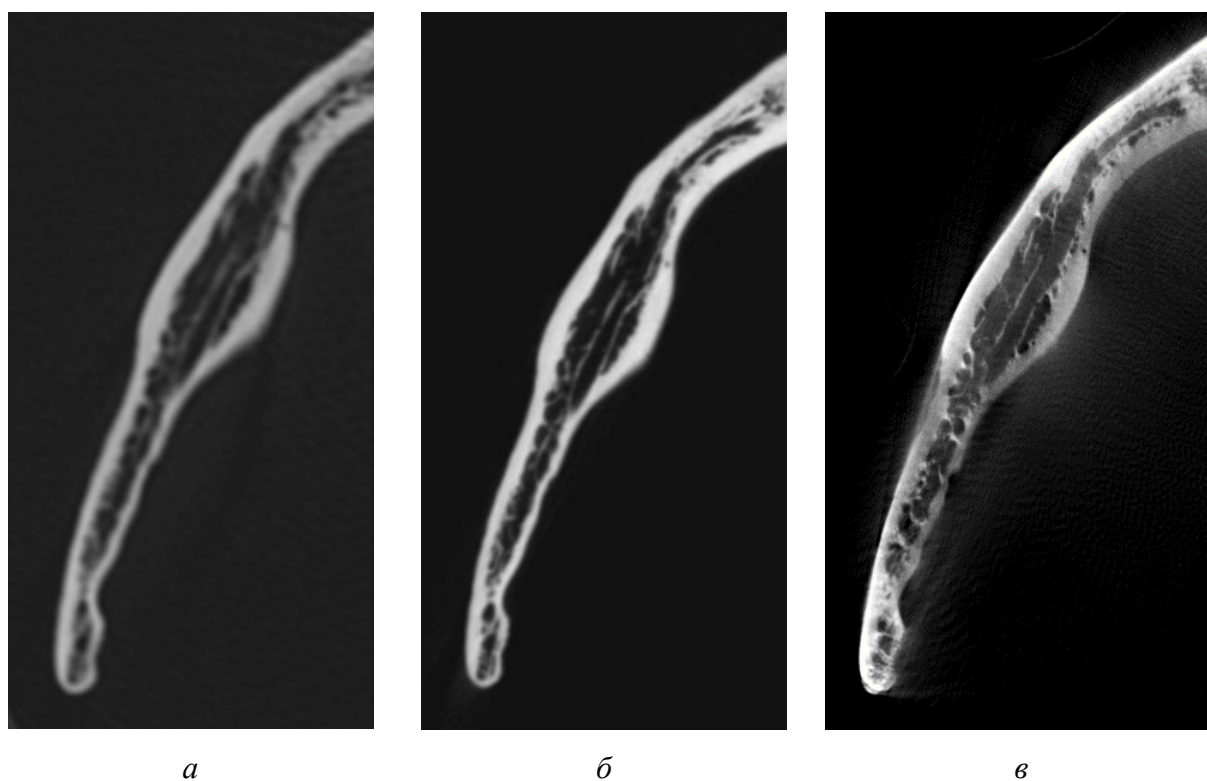


Рис. 46. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций нижней челюсти, в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма; *б* – КЛК-томограмма; *в* – микроКЛК-томограмма. На всех изображениях наблюдаются костные балки, плотность их расположения, толщина кортикального слоя, стенки нижнечелюстного канала

В то же время на мультипланарных реконструкциях по данным МСКТ и КЛКТ мелкие костные балки могли быть не видны по причине небольшого размера или в областях, где они располагались настолько плотно, что их очертания сливались воедино. На микроКЛК-томограммах за счет четкости и

высокого пространственного разрешения микроскопические размеры и близкое расположение единичных балок не препятствовали наблюдению (см. рис. 47, в, е).

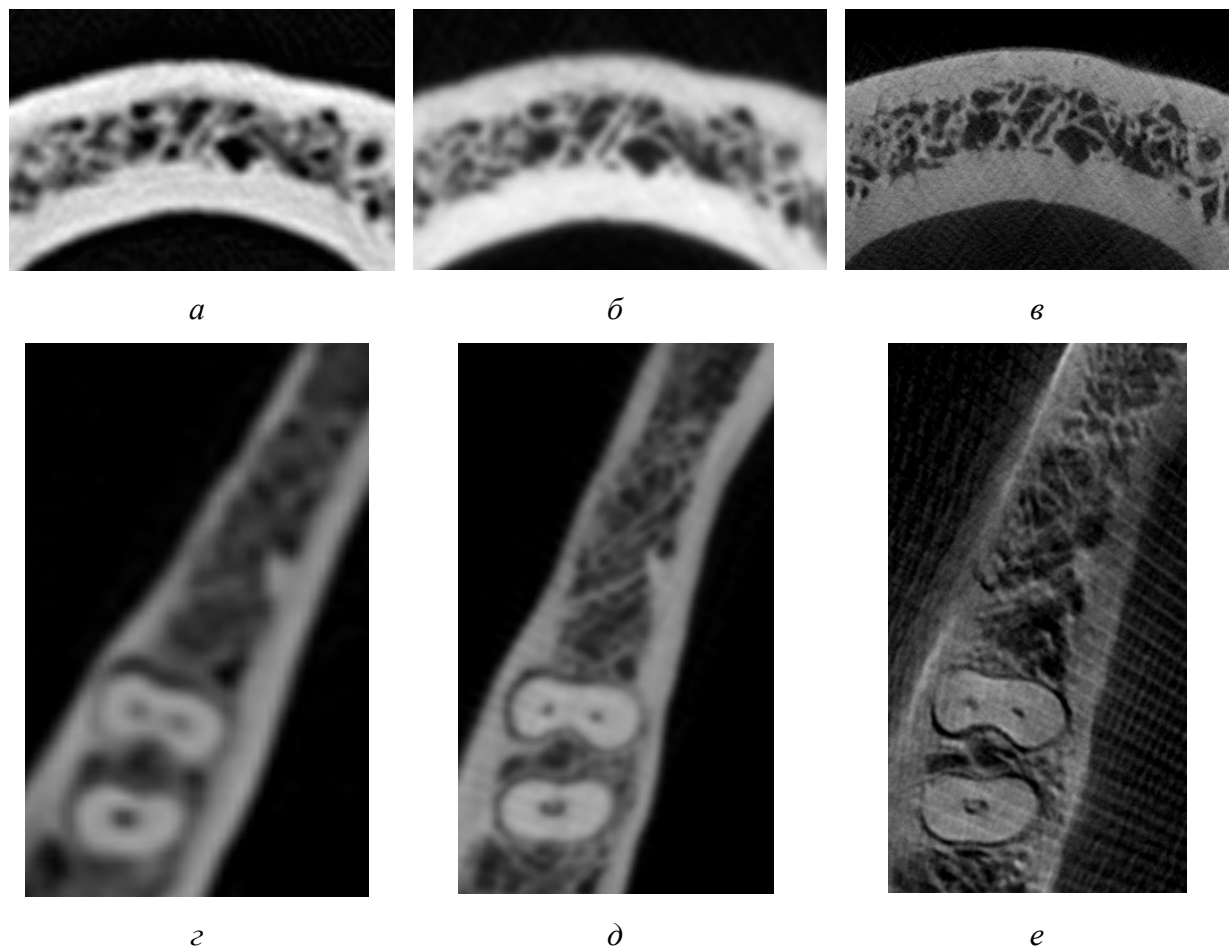


Рис. 47. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций нижней челюсти, в аксиальной плоскости: *а, г* – МСК-томограммы. *б, д* – КЛК-томограммы. *в, е* – микроКЛК-томограммы. На микроКЛК-томограммах видны микроскопические костные балки и содержимое корневого канала сохранившегося зуба, не заметные на МСК-томограммах и КЛК-томограммах

При помощи МСКТ и КЛКТ изучение компактной костной ткани было малоинформативно, так как ее структура выглядела по данным этих методик монолитной, с небольшим количеством мелких отверстий (рис. 48, а, б). На микроКЛК-томограммах компактной кости выявлялось большое количество каналов и отверстий микроскопического диаметра, пронизывающих плотное вещество кортикальной пластинки кости нижней челюсти и выходящих на ее поверхность (рис. 48, в).

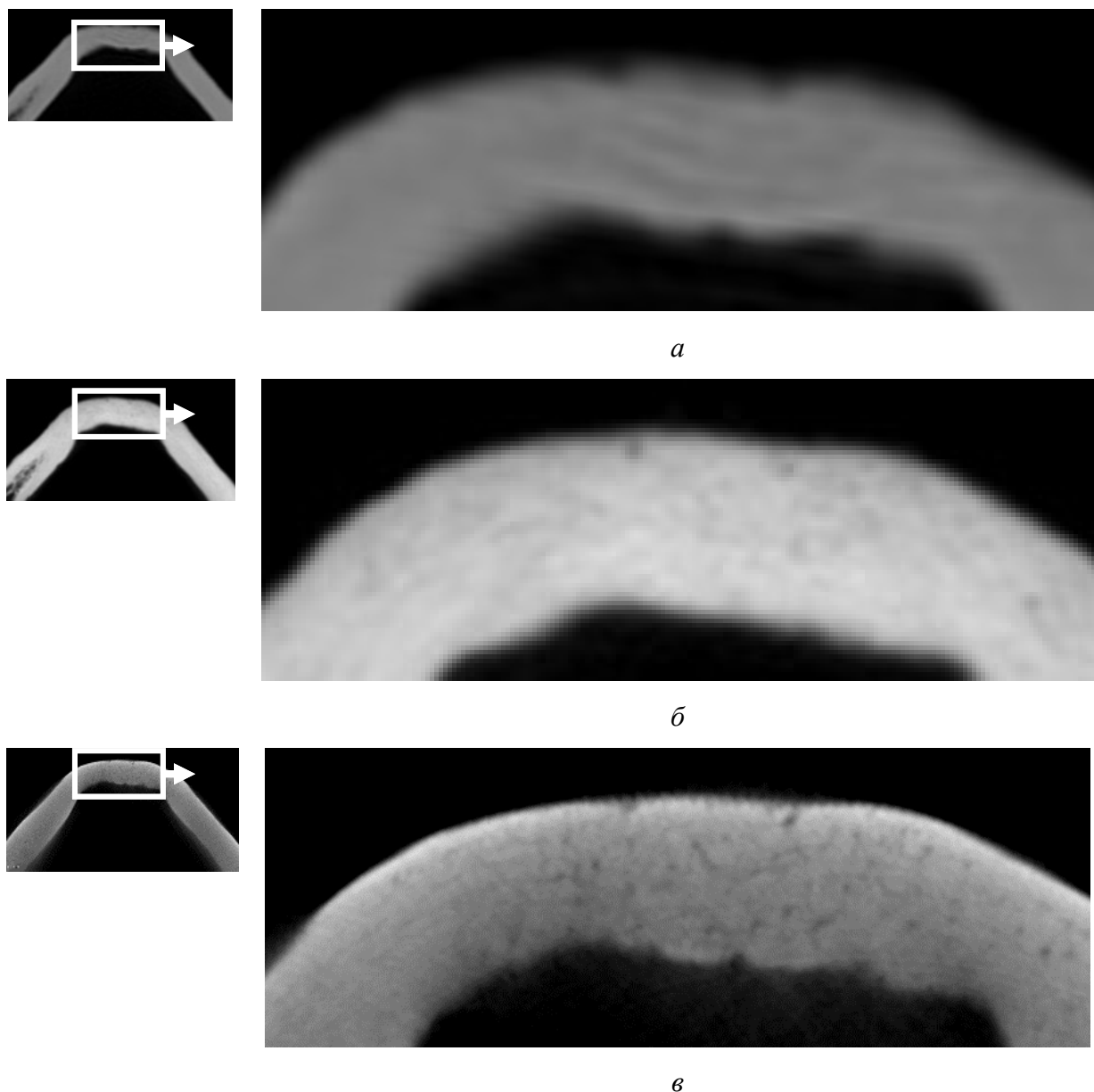


Рис. 48. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций кортикальной пластинки во фронтальной части тела нижней челюсти, в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Структура компактной кости не визуализируется, искажена артефактами; *б* – КЛК-томограмма. Несколько отверстий в плотном однородном веществе компактной кости; *в* – микроКЛК-томограмма. Множество микроскопических отверстий и каналов

Металлические объекты в области исследования МСКТ и КЛКТ нижней челюсти вызывали выраженные артефакты на изображениях, поэтому очертания металла были сильно сглажены, а костные структуры вблизи его поверхности скрыты артефактами от наблюдения (рис. 49, а, б). При использовании микроКЛКТ артефакты были менее яркими, контуры

металлических объектов выглядели четкими и наблюдались в деталях (рис. 49, в). Сложная геометрическая форма массивных металлических объектов приводила к формированию сложных по форме артефактов, которые могли практически не затрагивать часть изображения, но распространяться в другом направлении на значительном протяжении.

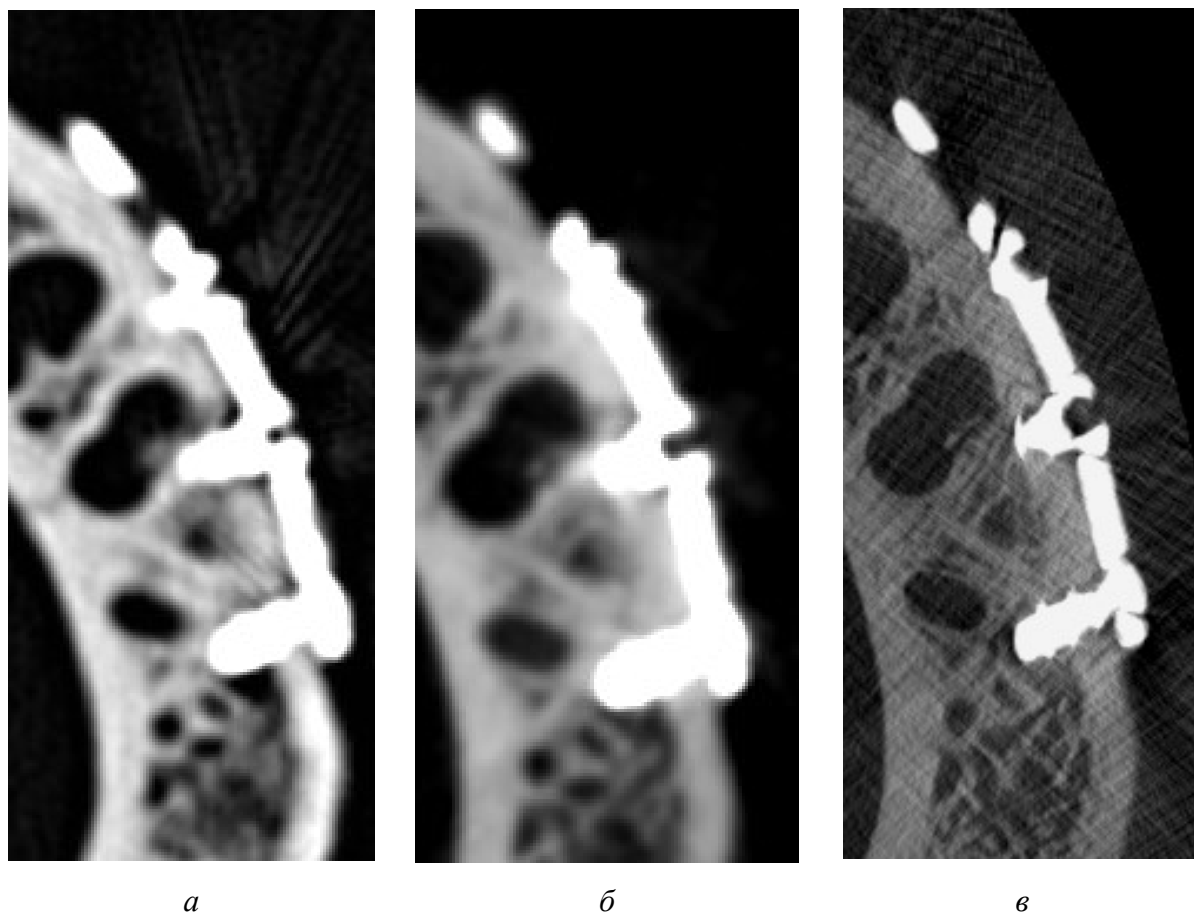


Рис. 49. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций тела нижней челюсти в области линии перелома, зафиксированной четырехзвеньеовой титановой пластиной с 4 винтами, в аксиальной плоскости: *а* – МСК-томограмма. Очертания металла сглажены, грубые артефакты деформируют изображение костных балок; *б* – КЛК-томограмма. Контуры металла нечеткие, линейные артефакты слабо выражены, костные структуры искажены только вблизи поверхности металла; *в* – микроКЛК-томограмма. Очертания металла четкие. Бледные линейные артефакты перекрывают все изображение

На микроКЛК-томограммах присутствие даже неярких артефактов приводило к потере информации о строении микроскопических и низкоплотных структур, которые оказывались плохо различимы на фоне артефактов (рис. 50).

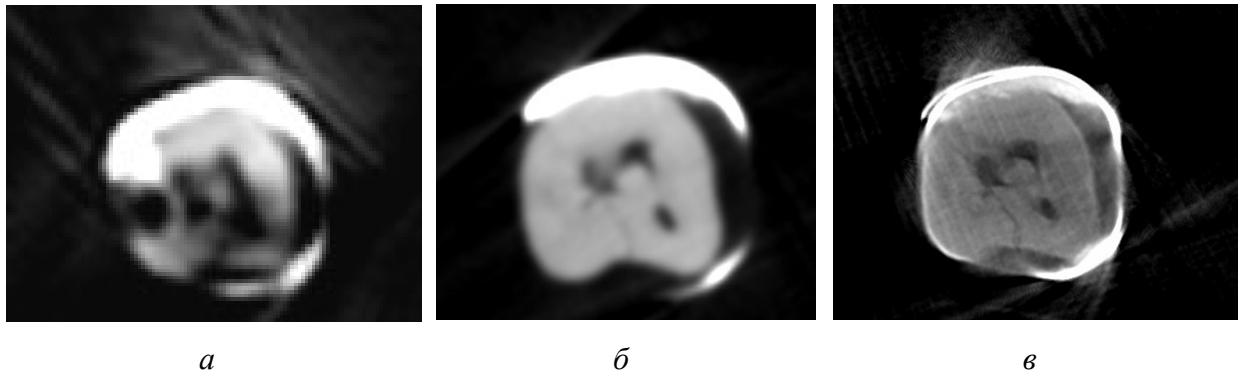


Рис. 50. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций нижней челюсти в области сохранившегося зуба, коронковая часть которого находится под массивной металлической конструкцией: *а* – МСК-томограмма. Нечеткие контуры металлического объекта. Выраженные артефакты распространяются на значительном расстоянии; *б* – КЛК-томограмма. Контуры металлической конструкции нечеткие, линейные артефакты слабо выражены; *в* – микроКЛК-томограмма. Контуры металла более четкие, артефакты выражены слабее, бледные линейные артефакты перекрывают все изображение

За счет того, что на микроКЛК-томограммах выявлялись микроскопические объекты и структуры низкой плотности, оказалась повышена уязвимость этих изображений к потере информации даже от слабо выраженных артефактов, яркость и размеры которых были сопоставимы с микроскопическими или низкоплотными деталями (рис. 51, *а* – *в*).

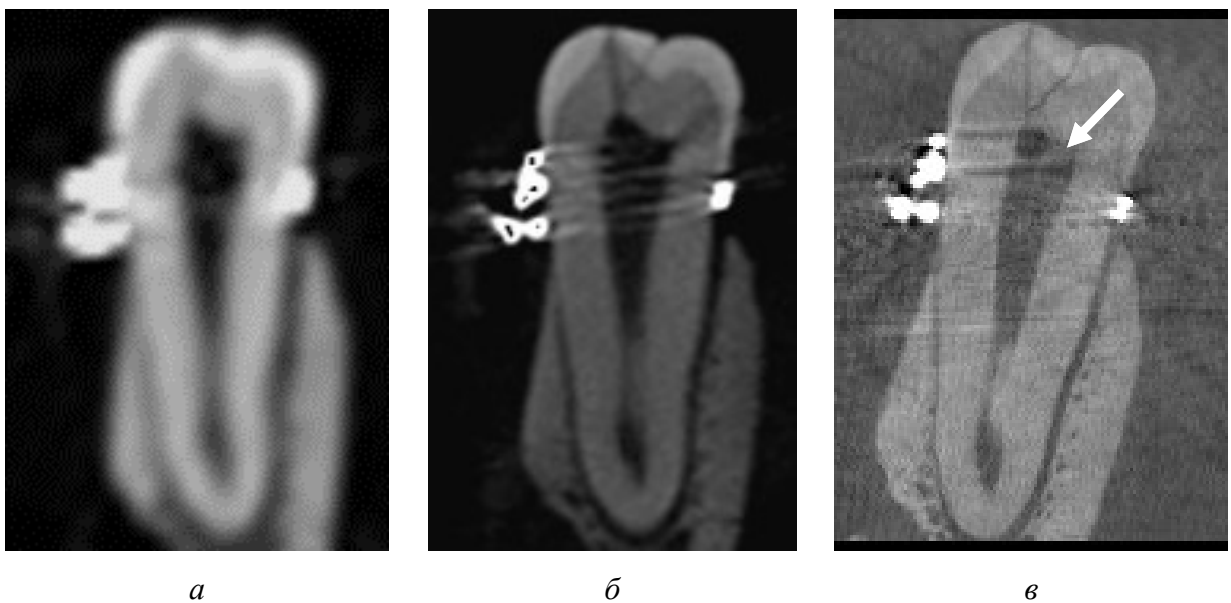


Рис. 51. Фрагменты изображений мультипланарных реконструкций нижней челюсти в области сохранившегося зуба, на котором закреплена металлическая проволока, в продольной плоскости: *а* – МСК-томограмма; *б* – КЛКТ; *в* – микроКЛКТ. По данным микроКЛКТ обнаруживается низкоплотное содержимое внутри полости зуба (*стрелка*). На микроКЛК-томограмме оно близко по яркости к артефактам от металла

Можно подвести итог, что все 3 использованные методики компьютерной томографии обнаруживают анатомические структуры нижней челюсти, но наиболее информативной является микроКЛКТ. При исследовании в присутствии металлических объектов, микроКЛКТ получает наибольшее количество информации о строении металла и окружающих его костных структур, но при этом возможна потеря информации за счет сокрытия микроскопических и низкоплотных деталей артефактами от металла.

Таким образом, был проведен сравнительный анализ возможностей методик компьютерной томографии в изучении препаратов кости нижней челюсти и удаленных зубов, в том числе в присутствии высокоплотных инородных материалов. Из 2 методик, применяемых в настоящее время в практической стоматологии, КЛКТ оказалась более информативной. Из всех 3 использованных методик больше всего информации о строении как костных структур, так и инородных материалов было получено при помощи микроКЛКТ. По результатам микроКЛКТ были обобщены рентгеносемиотические характеристики нескольких видов высокоплотных эндодонтических материалов и металлических объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мультисрезовая компьютерная томография и конусно-лучевая компьютерная томография применяются в стоматологии для исследования конфигурации костей черепа, строения корневых каналов зубов, оценки патологических и травматических изменений зубов и костной ткани, планирования и контроля лечебных вмешательств [1, 52, 54, 62, 92, 146, 147]. Информативность этих методик компьютерной томографии относительно друг друга зависит от модели томографа, программного обеспечения, области исследования и алгоритма сканирования [53, 54, 143, 152]. В стоматологии и челюстно-лицевой хирургии в большинстве ситуаций КЛКТ характеризуется достаточной информативностью, менее выраженными артефактами и более низкой по сравнению с МСКТ лучевой нагрузкой [54, 128, 141, 143, 162, 165]. С учетом постоянного развития возможностей современных диагностических аппаратов необходимо обновление рекомендаций и алгоритмов по использованию методик компьютерной томографии в клинической работе [40, 60, 87, 90, 147]. Кроме того, изображения, полученные при помощи МСКТ и КЛКТ, характеризуются отсутствием искажений и суммации, но страдают от артефактов при сканировании высокоплотных объектов [54, 128]. Поэтому данные методики, несмотря на свою высокую диагностическую эффективность, во многих ситуациях не дают достаточно информативных результатов при исследовании структур ЗЧС.

Микрофокусная технология в клинической практике представлена двухмерной рентгеновской съемкой. Микрофокусные рентгеновские снимки обладают высокой разрешающей способностью и контрастностью, возможностью многократного увеличения без потери резкости, эффектами псевдообъемного двухмерного изображения и фазового контраста. Это позволяет наблюдать мелкие и малоконтрастные детали, но не исключает искажений и суммации. Лучевая нагрузка при этом меньше, чем у традиционной рентгенографии с протяженным фокусным пятном [8, 45, 85].

Превосходство микрофокусной рентгенографии над традиционной рентгенографией в стоматологии доказано рядом исследований в диспансеризации, терапевтическом лечении и челюстно-лицевой хирургии [8, 45, 79, 100, 132].

Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография объединяет технологию КЛКТ с использованием микрофокусной рентгеновской трубки. Это позволяет сочетать их преимущества и получать более информативные изображения, чем при использовании КЛКТ или микрофокусной рентгенографии. В то же время для микроКЛКТ характерны ограниченный объем области исследования, длительное время сканирования и высокая чувствительность к смещению объекта исследования и элементов томографа, а регуляция лучевой нагрузки не является приоритетом в устройстве современных аппаратов для микроКЛКТ [6, 73, 117, 122, 132]. Поэтому большинство исследований с использованием микроКЛКТ представлены экспериментальными работами *in vitro*, а также небольшим числом сканирований мелких животных *in vivo*. МикроКЛКТ пробовали применять в сочетании с микроскопией или как альтернативу гистологическому исследованию [27, 59, 114, 132, 133, 135, 154]. Неразрушающий характер методики означает, что препараты не деформируются в ходе подготовки к работе и есть возможность оценивать весь объем предмета исследования и сохранять его для наблюдений в динамике [114, 126, 132, 144, 156]. При помощи микроКЛКТ было предложено изучать на микроскопическом уровне анатомические структуры организма человека и животных, образцы биопсии, физиологические и патологические процессы, последствия лечебных вмешательств в различных органах и системах [17, 112, 116, 132, 140]. Данные микроКЛКТ позволяют строить реалистичные трехмерные реконструкции для моделирования лечебных вмешательств, физиологических и патологических процессов [46, 47, 77, 83, 142]. В стоматологии микроКЛКТ применяли при визуализации микроскопических костных балок и дополнительных корневых каналов зубов,

для оценки последствий применения какого-либо эндодонтического материала или инструмента, в ходе исследования эффективности лечебных манипуляций [82, 94, 111, 114, 133, 163].

МикроКЛКТ не имеет широкого распространения в медицине. При анализе публикаций обнаруживается, что интерес к методике растет, но большинство исследований основано на небольшом объеме материала и носит пробный характер. Можно ожидать, что микроКЛКТ имеет потенциал превзойти МСКТ и КЛКТ по информативности, но возможности этой новой методики не раскрыты. Не изучена рентгеносемиотика различных органов и систем, инструментов и материалов, физиологических и патологических процессов по данным микроКЛКТ. Отечественными специалистами ведется разработка микрофокусных технологий [73, 86], но методика микроКЛКТ в России в медицинских исследованиях практически не используется.

Учитывая результаты существующих работ о применении микроКЛКТ в стоматологии, была высказана гипотеза, что данная методика высокоинформативна в исследовании препаратов ЗЧС, в том числе в присутствии высокоплотных инородных объектов. Подтверждение гипотезы было опубликовано в работах, посвященных строению костной ткани в присутствии металлических конструкций [11, 63–65, 67, 81, 158] и наблюдению корневых каналов удаленных зубов [11, 12, 65, 67–69]. Также проводилось описание рентгеносемиотики нескольких пломбировочных материалов по данным микроКЛКТ [13, 66, 69, 70, 80, 145, 148]. Кроме того, изучались особенности визуализации сломанных металлических инструментов в корневых каналах зубов как до, так и после лечения [13, 66, 69, 70, 145].

С целью совершенствования лучевой диагностики костных структур и высокоплотных инородных материалов в области зубочелюстной системы за счет сравнительного анализа информативности исследований с использованием мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий были поставлены задачи:

1. Провести сравнительный анализ информативности экспериментального исследования препаратов челюстей при использовании мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий;

2. Провести сравнительный анализ информативности экспериментального исследования удаленных зубов до и после эндодонтического лечения при использовании мультисрезовой, конусно-лучевой и микрофокусной конусно-лучевой компьютерных томографий;

3. Установить рентгеносемиотические признаки пломбировочных материалов, использованных при эндодонтическом лечении по результатам проведенных исследований компьютерных томографий;

4. Оценить влияние инородных высокоплотных материалов на информативность полученных диагностических изображений.

В качестве материалов использовались препараты удаленных зубов и 4 препарата кости нижней челюсти, 2 из которых содержали металлические конструкции, закрепленные на кости и зубах. Препараты кости нижней челюсти исследовались при помощи МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ. Кроме того, 136 корней ($n = 136$) у 76 удаленных зубов были исследованы при помощи МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ. Затем 109 корней ($n = 109$) у 71 удаленного зуба были обработаны эндодонтически и исследованы с применением КЛКТ и микроКЛКТ. В ходе лечения корни зубов пломбировались несколькими эндодонтическими материалами. В каналах некоторых корней были преднамеренно сломаны металлические инструменты, после чего часть из этих каналов также была запломбирована. Коронковые части зубов не реставрировались и в ходе последующего анализа не рассматривались.

После эндодонтической обработки корни пролеченных зубов можно было разделить на группы в зависимости от содержимого корневых каналов:

а) Содержат только фрагменты преднамеренно сломанных металлических инструментов для эндодонтического лечения (26 корней);

б) Содержат только кальций-алюмосиликатный цемент (20 корней);

в) Содержат фрагменты преднамеренно сломанных металлических инструментов для эндодонтического лечения и кальций-алюмосиликатный цемент (9 корней);

г) Содержат гуттаперчевые штифты для латеральной конденсации холодной гуттаперчи и цинкоксидэвгенольный силер (30 корней);

д) Содержат гуттаперчевые штифты для латеральной конденсации холодной гуттаперчи, цинкоксидэвгенольный силер и фрагменты преднамеренно сломанных металлических инструментов для эндодонтического лечения (10 корней);

е) Содержат термопластифицированную гуттаперчу на пластиковом носителе и силер на основе эпоксидной смолы (8 корней);

ж) Содержат термопластифицированную гуттаперчу на пластиковом носителе без силера (6 корней).

По результатам сканирований всех препаратов челюстей и корней удаленных зубов до и после лечения были построены мультипланарные и трехмерные реконструкции и проведен их сравнительный анализ.

В данном исследовании использовалась новая модель отечественного микрофокусного конусно-лучевого томографа, для которого на момент проведения эксперимента не существовало собственного программного обеспечения, в которое входили необходимые инструменты. Вместо этого применялась некоммерческая программа с открытым кодом 3D Slicer.

В ходе анализа результатов компьютерной томографии 136 корней 76 удаленных зубов до лечения производилась сравнительная оценка информативности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ по ряду параметров: строение корневых каналов, наличие переломов корней зубов и содержимого в полости корневых каналов.

Результаты микроКЛКТ невозможно описать, применяя существующие классификации, такие, как Vertucci, поскольку они не передают строение микроскопических корневых каналов. Общепринятого алгоритма для описания микроскопических корневых каналов по данным микроКЛКТ на

сегодняшний день не существует, хотя Ahmed H. M. A. и соавт. (2017) предложили условные обозначения для записи результатов микрофокусной компьютерной томографии. В данном исследовании при описании сложного строения корневых каналов зубов по результатам компьютерной томографии использовались характеристики, которые хорошо поддавались учету:

1. Количество корней с дополнительными каналами в апикальной части, которые заканчивались собственными апикальными отверстиями на поверхности корня.

По результатам МСКТ таких случаев не было обнаружено. По данным КЛКТ $n = 24$ (17,6%) корня содержали дополнительные корневые каналы. По данным микроКЛКТ данный признак обнаруживался в $n = 58$ (42,6%) корнях. Во всех случаях, кроме одного, число дополнительных корневых каналов в корне на микроКЛКТ-томограммах было больше или равно, чем на КЛКТ-томограммах.

2. Количество корней, в которых каналы разделялись на несколько близких по диаметру каналов в апикальной части корня, а также число сформировавшихся после разделения каналов в каждом корне.

По данным МСКТ этот признак обнаружился в $n = 1$ (0,7%) корне, КЛКТ – в $n = 11$ (8,1%) корнях и микроКЛКТ – в $n = 25$ (18,4%) корнях. Во всех случаях, когда разделение корневых каналов наблюдалось на КЛКТ-томограммах, его можно было видеть и на микроКЛКТ-томограммах.

3. Количество корней с дополнительными корневыми каналами, которые заканчивались отверстиями на поверхности зуба не в апикальной области корня.

По результатам МСКТ данный признак не обнаруживался, в то время как методика КЛКТ позволяла наблюдать его в $n = 10$ (7,3%) корнях, а микроКЛКТ – в $n = 14$ (10,3%) корнях. Все дополнительные каналы, обнаруженные на КЛКТ-томограммах, можно было также видеть на микроКЛКТ-томограммах.

4. Количество корней, в которых анастомозы соединяют между собой продольно направленные каналы.

По данным МСКТ анастомозы не обнаруживались. По результатам КЛКТ их можно было видеть в $n = 7$ (5,1%) корнях, микроКЛКТ – в $n = 18$ (13,2%) корнях.

5. Количество корней, в каналах которых было обнаружено содержимое.

По данным МСКТ корневые каналы зубов не содержали включений. На КЛКТ-томограммах в корневых каналах обнаруживались структуры высокой плотности в 14,7% ($n = 20$) случаев. По результатам микроКЛКТ всегда визуализировалось содержимое корневых каналов, видимое при помощи КЛКТ, а также дополнительно обнаруживались структуры как высокой, так и низкой плотности. Всего корневые каналы содержали включения по данным микроКЛКТ в 71,3% ($n = 97$) случаев.

6. Число корней, в которых были обнаружены продольные линии переломов, которые сообщались с полостью корневого канала.

Подобные повреждения обнаруживались при помощи МСКТ в 1,5% ($n = 2$) случаев, КЛКТ – в 21,3% ($n = 29$) случаев и микроКЛКТ в 42,6% ($n = 58$) случаев. Все продольные линии перелома, видимые при использовании КЛКТ, наблюдались также на микроКЛКТ-томограммах.

В научной литературе существует большое количество работ, посвященных строению корневых каналов по данным компьютерной томографии. Большинство из них – ретроспективные исследования, в которых проводится анализ архивов из десятков и сотен клинических исследований с целью определить число и тип строения корневых каналов по таким системам, как классификация Vertucci. Ozcan G. и соавт. (2016), Martins J. N. R. и соавт. (2019), Liu X. и соавт. (2021) отмечают, что в таких исследованиях широко применяется КЛКТ, которая считается оптимальной методикой для изучения корневых каналов в клинической практике. Реже встречаются экспериментальные исследования корневых каналов с использованием

удаленных зубов, что позволяет подтвердить результаты КЛКТ при помощи распиливания и микроскопии препаратов (Батюков Н. М. и др., 2016). Экспериментальные и ретроспективные клинические исследования подтверждают более высокую информативность КЛКТ по сравнению с прицельной рентгенографией при изучении строения корневых каналов зубов. В данном исследовании подтвердилась целесообразность применения КЛКТ как методики выбора при изучении корневых каналов в клинических ситуациях. Среди публикаций на тему микроКЛКТ в стоматологии по результатам анализа Aksoy U. и соавт. (2021) изучение строения корневых каналов препаратов удаленных зубов является одной из самых популярных тем. Как можно видеть на примере работ Wolf T. и соавт. (2017) и Xu T. и соавт. (2020), эти исследования демонстрируют сложное строение и вариабельность корневых каналов по данным микрофокусного сканирования от десятков и сотен до тысяч препаратов удаленных зубов. Разнообразие конфигураций дополнительных каналов отмечалось в длине, форме, диаметре и извилистости, как можно видеть в работе Xu T. и соавт (2016). Результаты данной диссертационной работы соответствовали выводам существующих исследований о высокой информативности микроКЛКТ при визуализации дополнительных корневых каналов. В то же время нами была проведена уникальная работа по сравнительному анализу данных МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ одних и тех же препаратов удаленных зубов по нескольким параметрам. В результате экспериментально подтвердились заключения Liu X. и соавт. (2021) о том, что высокое пространственное разрешение должно привести к повышению информативности микроКЛКТ при обнаружении корневых каналов по сравнению с другими видами компьютерной томографии.

Тема визуализации содержимого в полости корневых каналов не раскрыта среди исследований с использованием микрофокусной компьютерной томографии. В данной работе внимание уделялось способности различных методик компьютерной томографии обнаруживать содержимое

корневых каналов как высокой, так и низкой плотности. Нами было доказано, что микроКЛКТ позволяет получить информацию о наличии и структуре содержимого корневого канала, которая недоступна по результатам КЛКТ и МСКТ. По данным микроКЛКТ обнаруживались не только высокоплотные округлые или точечные образования, но и структуры как низкой, так и высокой плотности неправильной формы.

Одним из параметров, которые рассматривались в данной диссертационной работе при изучении корней препаратов зубов до лечения, было наличие продольных переломов в дентине корней зубов. В ходе диссертационного исследования зубы подвергались физическому воздействию в процессе удаления, а затем хранились в сухом виде, так как для задач данной работы не требовалось поддерживать химический состав и влажность окружающей среды. Это следует учитывать при оценке результатов эксперимента, так как, по данным De-Deus G. и соавт. (2019), условия хранения и манипуляции над препаратами влияют на их хрупкость и способствует формированию новых повреждений, что может привести к ошибкам в заключениях экспериментальных работ. В ходе данного исследования сканирование с использованием микроКЛКТ проводилось в первую очередь. Следовательно, было больше шансов обнаружить линии перелома в дентине по результатам МСКТ и КЛКТ, так как вероятны дополнительные повреждения препаратов при хранении, сканировании и транспортировке. Несмотря на это, больше всего переломов в дентине корней зубов обнаружилось при использовании микроКЛКТ.

По данным анализа Новожиловой Н. Е. и соавт. (2018) в клинической практике продольные переломы корня по данным КЛКТ обнаруживаются не всегда. По данным Ashmawy M. S. и соавт. (2017), МСКТ уступает КЛКТ в обнаружении продольных переломов корня зуба. Это соответствует заключениям, полученным в ходе диссертационной работы. Поиск линий переломов в дентине при помощи микроКЛКТ проводился в небольшом количестве публикаций, чаще всего при изучении последствий применения

различных эндодонтических инструментов для механической обработки корневых каналов. Bayram H. M. и соавт. (2017), Zuolo M. L. и соавт. (2017) отмечали высокую информативность микроКЛКТ при поиске микротрещин в дентине, а также такие преимущества перед электронной микроскопией, как неразрушающий характер наблюдения и возможность изучения сотен мультипланарных реконструкций вместо нескольких срезов. В данной диссертационной работе было подтверждено, что в эксперименте для неразрушающего лучевого исследования микроКЛКТ следует использовать как методику выбора.

По результатам диссертационного исследования, МСКТ по всем перечисленным выше параметрам оказалась крайне малоинформативна по сравнению с КЛКТ и микроКЛКТ. Способность микроКЛКТ обнаруживать микроскопические особенности строения корней удаленных зубов была выше КЛКТ во всех случаях. Достоверность заключений о значимости различий в информативности МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ подтвердилась при помощи статистического анализа с применением критерия Вилкоксона для непараметрических данных. В ходе попарного сравнения таблиц результатов МСКТ и КЛКТ, МСКТ и микроКЛКТ, КЛКТ и микроКЛКТ по всем 6 критериям для каждого из 136 корней удаленных зубов получилось значение $p < 0,05$, что подтверждает значимость обнаруженных различий в информативности исследования.

По причине крайне низкой информативности МСКТ на первом этапе работы при исследовании препаратов удаленных зубов после лечения использовались только КЛКТ и микроКЛКТ. Проводилась сравнительная оценка мультипланарных реконструкций КЛКТ и микроКЛКТ каждого из 109 пролеченных корней. В итоге можно было обобщить рентгенологические характеристики пломбировочных материалов и металлических объектов в корневых каналах.

По данным анализа Aksoy U. и соавт. (2021) исследование пролеченных корней удаленных зубов – одна из самых распространенных тем среди

публикаций с применением микроКЛКТ в стоматологии. Данное диссертационное исследование отличается тем, что производился сравнительный анализ 2 методик компьютерной томографии (КЛКТ и микроКЛКТ) по ряду параметров, что является более многосторонним анализом по сравнению с существующими публикациями. Изученные характеристики включали характер распределения пломбировочного материала в корневых каналах, его относительную плотность и выраженность артефактов, пустоты в глубине материала и на границе контакта с окружающей средой, количество и расположение включений.

Большинство публикаций о применении микроКЛКТ для исследования пролеченных зубов посвящено способности пломбировочных материалов однородно и плотно заполнять корневые каналы, согласно анализу научной литературы Aksoy U. и соавт. (2021). Для оценки этого параметра, как можно видеть на примере работ Jho W. и соавт. (2016), Castagnola R. и соавт. (2018), распространенной методикой является подсчет объема пустот внутри пролеченных каналов удаленных зубов с учетом объема полостей внутри пломбировочного материала и на его границе с дентином. Следует отметить, что неизвестно, насколько автоматизированные алгоритмы для вычисления объемов в различном программном обеспечении влияют на достоверность заключений подобных исследований. В ходе данной экспериментальной работы было обнаружено, что автоматические инструменты часто не в состоянии зарегистрировать хорошо видимые дополнительные каналы и пломбировочные материалы. При этом наличие даже слабовыраженных артефактов на изображении могло привести к очевидным грубым ошибкам. На иллюстрациях в изученных публикациях по теме работы реконструкции запломбированных корней не содержали микроскопических дополнительных каналов, из чего можно сделать вывод, что они не учитывались при анализе. Преднамеренная экспериментальная obturation боковых корневых каналов обнаружилась только в эксперименте Suguro H. и соавт. (2018) с использованием фантома. Поэтому нами высказывается предположение, что

алгоритмы экспериментов с применением автоматических инструментов для измерения корневых каналов должны быть проанализированы и доработаны с целью проверки и повышения достоверности.

Torres F. F. E. и соавт. (2017, 2018) предлагали исследовать порозность и другие свойства эндодонтических материалов при помощи образцов, приготовленных вне препаратов зубов и поэтому имеющих более простую для анализа геометрическую форму. В данной диссертационной работе для изучения структуры эндодонтических материалов был разработан протокол действий с использованием препаратов удаленных зубов для имитации наблюдения запломбированного корневого канала. Автоматизированные алгоритмы для оценки изображений не применялись по указанным выше причинам, описание пустот в корневом канале проводилось в виде заключения.

По результатам Castagnola R. и соавт. (2018), Torres F. F. E. и соавт. (2018), в составе эндодонтических материалов при сканировании микроКЛКТ всегда обнаруживаются микроскопические пустоты, что было подтверждено результатами данного исследования. На реконструкциях КЛКТ пустоты в пролеченных корневых каналах обнаруживались только в случае выраженного неплотного пломбирования, тогда как на микроКЛКТ-томограммах в толще структуры всех пломбировочных материалов и на границе их контакта со стенками канала и другими материалами удавалось обнаружить полости микроскопических размеров, в том числе в плотно и однородно запломбированных каналах.

Характеристикам пломбировочных материалов по результатам микроКЛКТ, помимо полостей в пролеченных каналах, в научной литературе уделяется мало внимания. Единичные пробные экспериментальные исследования, такие, как работы Васильева А. Ю. и соавт. (2017, 2018), давали основания ожидать, что микроКЛКТ позволит изучить рентгеносемиотику пломбировочных материалов. Поэтому описание и сравнительный анализ

рентгенологических признаков по результатам КЛКТ и микроКЛКТ, приведенные ниже, являются уникальными.

Было установлено, что на КЛКТ-томограммах определение распределения пломбировочных материалов в корневых каналах затруднено по причине артефактов, которые вызывали нерезкость очертаний каналов и их содержимого. По данным микроКЛКТ всегда можно было определить, являлся ли пломбировочный материал пластичным веществом, которое принимало форму корневого канала, или же в состав материала входили менее эластичные элементы. Кальций-алюмосиликатный цемент, а также цинкоксидэвгенольный силер и силер на основе эпоксидной смолы были пластичными пастами, которые принимали форму корневых каналов и затвердевали после пломбирования. Разогретая для лечения термопластифицированная гуттаперча также была пластичной, но obturаторы содержали плотные пластиковые стержни. Гуттаперчевые штифты имели вид гибких конусов разного диаметра. Под давлением штифты деформировались и сохраняли измененную форму даже после прекращения воздействия внешней силы.

Все пломбировочные материалы обладали плотностью выше дентина. По данным КЛКТ каналы, пролеченные разными видами гуттаперчи, выглядели более плотными и вызывали более выраженные артефакты по сравнению с каналами, содержащими кальций-алюмосиликатный цемент. При наличии нескольких пломбировочных материалов в одном канале границы между ними не определялись. По результатам микроКЛКТ эндодонтические материалы в одном канале хорошо различались в большинстве случаев. Наименее плотными были пасты: силеры и цемент. Гуттаперчевые штифты и термопластифицированная гуттаперча характеризовались более высокой плотностью, причем obturаторы для пломбирования термопластифицированной гуттаперчей содержали пластиковые стержни, которые выделялись множеством рентгеноконтрастных включений. Термопластифицированная гуттаперча и силер на основе эпоксидной смолы

по структуре отличались только плотностью и поэтому могли сливаться на многих изображениях.

Структура эндодонтических материалов по данным КЛКТ всегда выглядела однородной. Только на некоторых мультипланарных реконструкциях корней зубов, пролеченных методом латеральной конденсации холодной гуттаперчи, в зависимости от яркости и контрастности изображения выделялись отдельные гуттаперчевые штифты в корневых каналах. По результатам микроКЛКТ всегда можно было видеть строение пломбировочных материалов в корневых каналах. Гуттаперчевые штифты, термопластифицированная гуттаперча и силер на основе эпоксидной смолы обладали однородной структурой. Цинкоксидэвгенольный силер содержал рентгеноконтрастные точечные включения. Кальций-алюмосиликатный цемент имел мелкозернистую структуру по причине большого числа хаотично расположенных плотных микроскопических включений.

Артефакты влияли на информативность КЛКТ за счет нечеткости внешних контуров и внутренней структуры эндодонтических материалов высокой плотности, а также в результате сокрытия и искажения структур, которые находились вблизи поверхности пломбировочного материала. Более плотные материалы вызывали более яркие артефакты. На микроКЛКТ-томограммах артефакты от пролеченных каналов затрудняли изучение только для низкоплотных микроскопических структур, прилежащих к поверхности пломбировочных материалов.

В итоге по результатам КЛКТ об эндодонтических материалах удалось получить следующие данные:

- наличие эндодонтического материала в корневом канале;
- крупные дефекты пломбирования.

По результатам микроКЛКТ можно было выявить:

- наличие эндодонтического материала в корневом канале;
- наличие более чем одного эндодонтического материала в корневом канале;

- распределение в канале всех обнаруженных пломбировочных материалов;
- пустоты в глубине эндодонтических материалов, у стенок корневого канала и между двумя разными материалами в канале, в том числе полости микроскопических размеров в плотно запломбированных каналах;
- наличие и характер включений в структуре пломбировочных материалов;
- плотность эндодонтических материалов относительно друг друга и тканей зуба.

Обнаруженные с использованием микроКЛКТ рентгенологические характеристики пломбировочных материалов позволяли, даже не имея сведений о проведенном лечении, опознать пломбировочный материал в корневом канале удаленного зуба.

В научной литературе встречаются немногочисленные упоминания об использовании компьютерной томографии для изучения сломанных эндодонтических инструментов. Ramos Brito A. С. и соавт. (2016), Costa E. и соавт. (2020) отмечали низкую информативность КЛКТ при обнаружении сломанных инструментов в пролеченных каналах, что соответствует результатам данной диссертационной работы. В ходе ее подготовки наблюдалось, что в присутствии гуттаперчевых штифтов металлические инструменты в корневых каналах сливались в единую массу с пломбировочным материалом либо выглядели идентично штифту в зависимости от контрастности, яркости и плоскости КЛК-томограммы. Для того чтобы обнаружить фрагменты металла на фоне кальций-алюмосиликатного цемента, на многих мультипланарных реконструкциях требовалось изменить параметры контрастности и яркости. По этой причине сломанные инструменты в заполненных кальций-алюмосиликатным цементом каналах можно пропустить, если не заниматься целенаправленно их поиском. По данным КЛКТ удалось построить трехмерные модели фрагментов металла в каналах, содержавших кальций-алюмосиликатный цемент, но не

гуттаперчевые штифты. На КЛК-томограммах металлические фрагменты имели размытые контуры, а форма их в поперечном сечении всегда была круглой. Поэтому трехмерные модели по данным КЛКТ имели сглаженные поверхности.

Исследования металлических инструментов с применением микроКЛКТ характеризовались более высокой информативностью. Gao. Y. и соавт. (2015), Meng Y. и соавт. (2020) и предлагали использовать микроКЛКТ сломанного инструмента в корневом канале для анализа ошибок при лечении и виртуального моделирования операции по извлечению отломка. Это было возможно, так как металлические фрагменты и окружающие структуры визуализировались в деталях и не искажались артефактами от металла. В ходе данного диссертационного исследования были получены схожие результаты о высокой информативности микроКЛКТ при детальном изучении металлических объектов и прилежащих структур на примере как пролеченных, так и незапломбированных корневых каналов с обломками инструментов. Анализ внутренней структуры металлических фрагментов нами не проводился, но по данным Zinelis S. и соавт. (2018) микроКЛКТ можно использовать для поиска микротрещин в отработанных эндодонтических файлах с целью изучить механизмы поломки инструментов во время лечения.

На микроКЛК-томограммах по результатам данного исследования сломанные инструменты имели четкие контуры, поэтому хорошо определялась круглая, треугольная и четырехугольная формы обломков в поперечной плоскости. По данным микроКЛКТ удавалось построить высоко детализированные трехмерные реконструкции, близкие по форме к реальным объектам.

При сравнении моделей сломанных инструментов по результатам КЛКТ и микроКЛКТ трехмерные реконструкции по данным КЛКТ выглядели крупнее в объеме. После подсчета объема моделей (в мм³) фрагменты металла в корневых каналах по результатам КЛКТ всегда были больше по объему, чем

модели для того же обломка по данным микроКЛКТ, причем более чем в 3 раза в 91,4 % (n = 32) случаев и более чем в 6 раз в 45,7% (n = 16) случаев. Также было проведено измерение площади поверхности моделей (в мм²). Сглаженные, лишенные деталей поверхности моделей по данным КЛКТ имели площадь поверхности больше, чем модели микроКЛКТ, в 88,6% (n = 31) случаев, при этом в 45,7% (n = 16) случаев более чем в 2 раза. Длина фрагментов по данным КЛКТ была больше, чем по данным микроКЛКТ в 57,1% (n = 20) случаев. Для 31,4% (n = 11) случаев разница в измерениях длины по результатам КЛКТ и микроКЛКТ составляла более 10% от предполагаемой длины фрагмента, а также более 5% для 71,4% (n = 25) случаев. Таким образом, для моделей, построенных по данным КЛКТ, были свойственны выраженная потеря мелких деталей и значительное увеличение объема и площади поверхности. Значимость различий подтвердилась в ходе статистического анализа таблицы результатов измерений каждого металлического фрагмента с применением критерия Вилкоксона. Значимой закономерности в различии измерений длины обломков инструментов по данным КЛКТ и микроКЛКТ не было выявлено.

Таким образом, КЛКТ не всегда позволяла установить присутствие металлических объектов в корневых каналах, а успех обнаружения зависел от присутствия эндодонтических материалов в канале и внимательности наблюдателя. Оценка формы и объема металлических объектов по данным КЛКТ была затруднена по причине артефактов от металла и пломбирочных материалов. МикроКЛКТ всегда позволяла обнаружить сломанные инструменты в корневых каналах, а также предоставила достаточно данных для построения детальных трехмерных моделей.

Анализ возможностей МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ в оценке костной ткани проводился на основании реконструкций по данным сканирования 4 препаратов нижней челюсти.

При оценке анатомических ориентиров нижней челюсти по данным Saati S. и соавт. (2017) КЛКТ являлась более информативной методикой, чем

МСКТ, но авторы допускают, что результат зависит от модели томографа. В ходе данного диссертационного исследования нижнечелюстной канал, периодонтальные щели и другие анатомические ориентиры были обнаружены при помощи всех 3 методик компьютерной томографии. Различия между ними проявлялись в способности наблюдать микроскопические костные образования и информативности исследования в присутствии металлических объектов. Из 3 методик МСКТ была наименее информативной. Выбранный протокол сканирования позволил достичь четкости и контрастности, которые приближались к результатам исследования КЛКТ, но при этом были сильно выражены артефакты от структур высокой плотности, таких, как эмаль зубов и металлические конструкции. Значительное снижение информативности МСКТ и КЛКТ в присутствии высокоплотных объектов также наблюдали Bohner L. O. L. и соавт. (2017) в ходе исследования структуры костной ткани в присутствии имплантатов.

Наиболее информативной из 3 методик компьютерной томографии при исследовании препаратов челюсти по результатам данной работы была микроКЛКТ. При помощи этой методики обнаруживались микроскопические костные балки вне зависимости от их взаимного расположения, т. е. даже в областях их плотного скопления, где на КЛК- и МСК-томограммах происходило слияние отдельных элементов воедино. Очертания металлических объектов были более четкими, по сравнению с МСКТ и КЛКТ. Главным недостатком микроКЛКТ оказалась чувствительность к артефактам, которые полностью покрывали изображения, содержавшие металлические объекты. За счет способности микроКЛКТ к обнаружению микроскопических низкоплотных структур на изображениях находилось много деталей, которые оказались сопоставимы по яркости с артефактами. По этой причине, несмотря на слабую выраженность артефактов, на микроКЛК-томограммах они могли привести к потере новой информации. Возможности микроКЛКТ при визуализации трабекул и компактной костной ткани, а также влияние артефактов на результаты исследования подтверждаются данными Irie M. S. и

соавт. (2018). На основании исследования препаратов костной ткани с металлическими имплантатами de Faria Vasconcelos К. и соавт. (2016) подтверждается высокая информативность микроКЛКТ в присутствии плотных инородных объектов.

Следует отметить, что в существующих научных публикациях не установлена связь между результатами микроКЛКТ структур ЗЧС в эксперименте и клиническими проявлениями. На данном этапе внедрения микрофокусной компьютерной томографии в медицину доказано, что при помощи микроКЛКТ стали доступными для изучения ранее невидимые особенности строения ЗЧС и стоматологических материалов.

В итоге, в ходе данной диссертационной работы был выполнен сравнительный анализ информативности экспериментального исследования препаратов челюстей и удаленных зубов до и после эндодонтического лечения при использовании МСКТ, КЛКТ и микроКЛКТ. Наиболее информативной методикой оказалась микроКЛКТ, наименее информативной – МСКТ. Были установлены рентгеносемиотические признаки нескольких пломбировочных материалов, использованных при эндодонтическом лечении, по данным микроКЛКТ. Результаты всех исследований после эндодонтического лечения и в присутствии металлических объектов были обобщены, что позволило сделать заключение о влиянии инородных высокоплотных материалов на информативность диагностических изображений. Результаты диссертационного исследования сопровождались иллюстрациями и подвергались оценке с применением современных методов статистического анализа.

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования препаратов нижней челюсти микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография характеризовалась наиболее высокой информативностью, так как позволяла по сравнению с мультисрезовой и конусно-лучевой компьютерной томографией дополнительно выявить микроскопические и плотно расположенные костные балки, каналы и отверстия в кортикальной кости.

2. По результатам микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии удаленных зубов до лечения обнаруживались дополнительные каналы в апикальной части корня в 42,6% (n = 58), дополнительные каналы за пределами апекса в 10,3% (n = 14), разделение одного канала на несколько каналов в 18,4% (n = 25), анастомозы в 13,2% (n = 18), содержимое в каналах в 71,3% (n = 97), продольные переломы корня в 42,6% (n = 58) случаев. При использовании конусно-лучевой компьютерной томографии выявляемость перечисленных признаков всегда была ниже в 5 из 6 категорий как минимум в 2 раза. При помощи мультисрезовой компьютерной томографии не удалось визуализировать дополнительные корневые каналы, анастомозы и содержимое каналов, а разделение канала в апикальной части и продольные переломы корня были выявлены только в n = 1 корне (0,7%) и n = 2 корнях (1,5%) соответственно.

3. При анализе данных микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии препаратов зубов после эндодонтического лечения пломбировочные материалы были охарактеризованы по ряду критериев: распределение в корневых каналах; плотность относительно дентина и других пломбировочных материалов; наличие и характер включений; присутствие полостей в толще материала и в области его контакта со стенками и содержимым корневого канала. По перечисленным характеристикам для каждого пломбировочного материала сформировалась уникальная рентгеносемиотическая картина.

4. Массивные металлические конструкции, закрепленные на препаратах нижней челюсти, и фрагменты металлических инструментов, преднамеренно сломанные в корневых каналах удаленных зубов, меньше всего влияли на информативность изображений при использовании микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии. Только при использовании микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии можно было обнаружить все фрагменты сломанных металлических инструментов в запломбированных корневых каналах удаленных зубов. Объем трехмерных моделей фрагментов металла в корневых каналах по результатам конусно-лучевой компьютерной томографии всегда был больше по объему, чем по данным микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии, а площадь поверхности моделей больше в 88,6% (n = 31) случаев.

5. Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография – более информативная методика в исследовании препаратов нижней челюсти и корней удаленных зубов до и после эндодонтического лечения, а также в присутствии металлических объектов по сравнению с мультисрезовой и конусно-лучевой компьютерными томографиями.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для сканирования препаратов зубочелюстной системы с применением отечественного микрофокусного компьютерного томографа МРКТ-04 рекомендованы параметры сканирования 92 кВ / 60 мкА / размер вокселя 20 мкм или 120 кВ / 25 мкА / размер вокселя 44 мкм для препаратов нижней челюсти и 92 кВ / 60 мкА / размер вокселя 8–20 мкм для препаратов удаленных зубов до и после эндодонтического лечения.

2. При экспериментальном исследовании препаратов нижней челюсти рекомендовано применение микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии как наиболее информативной методики при визуализации микроскопических костных структур.

3. Микрофокусную конусно-лучевую компьютерную томографию следует использовать при изучении корней удаленных зубов до и после эндодонтического лечения с целью обнаружить дополнительные корневые каналы и анастомозы, содержимое корневых каналов и продольные переломы корней, достигающие полости корневого канала, а также при исследовании результатов эндодонтического лечения и структуры пломбировочных материалов.

4. Уникальные рентгеносемиотические характеристики пломбировочных материалов по данным микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии позволяют в ходе экспериментального исследования опознать содержимое корневых каналов зубов после лечения.

5. В ходе экспериментального исследования препаратов зубочелюстной системы в присутствии металлических объектов и других инородных структур высокой плотности, таких, как пломбировочные материалы, рекомендовано использование микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии как наиболее информативной методики в присутствии высокоплотных инородных структур.

6. Применение мультисрезовой компьютерной томографии для изучения зубочелюстной системы нецелесообразно по причине низкой информативности методики. Возможности конусно-лучевой компьютерной томографии ограничены при исследовании микроскопических структур и высокоплотных инородных материалов в области зубочелюстной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, А. Н. Вариантная лучевая анатомия слезного мешка при визуализации методом бесконтрастной компьютерной томографии / Агеев А. Н., Дергилев А. П., Ободов В. А. // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2016. – Т. 97. – № 1. – С. 14–19.
2. Анохин, Д. Ю. Обоснование применения цифровой микрофокусной рентгенографии с прямым увеличением изображения в 5,5 раза для обследования кистей пациентов с ревматоидным артритом / Анохин Д. Ю., Железняк И. С. // Радиология – практика. – 2016. – № 6 (60). – С. 6–15.
3. Анохин, Д. Ю. Возможности цифровой микрофокусной рентгенографии с прямым увеличением изображения в выявлении эрозивного поражения костной ткани при раннем ревматоидном артрите (цифровая радиология и телерадиология) / Анохин Д. Ю., Железняк И. С., Малаховский В. Н. и др. // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – № 1 (9). – С. 175–176.
4. Аржанцев, А. П. Рентгенология в стоматологии: руководство для врачей / Аржанцев А. П. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 304 с.
5. Батюков, Н. М. Возможности визуализации структуры зубов с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии и микроскопа при эндодонтическом лечении / Батюков Н. М., Константинов А. А., Чибисова М. А. // Институт стоматологии. – 2016. – № 3 (72). – С. 38–41.
6. Бессонов, В. Б. Микрофокусные рентгеновские компьютерные томографы семейства МРКТ: опыт разработки и эксплуатации / Бессонов В. Б., Ободовский А. В., Ларионов И. А. и др. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Труды XIII Международной научной конференции с научной молодежной школой имени И. Н. Спиридонова в 2-х книгах. Книга I. – Владимир-Суздаль, 2018. – С. 88–91.

7. Васильев, А. Ю. Особенности изображения, полученного из микрофокусного источника (экспериментальное исследование) / Васильев А. Ю., Петровская В. В., Алпатова В. Г. и др. // Сибирский медицинский журнал. – 2010. – Т. 25. – № 3–2. – С. 7–10.

8. Васильев, А. Ю. Эффективность микрофокусной рентгенографии / Васильев А. Ю., Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. // Радиология – практика. – 2016. – № 3 (57). – С. 8–14.

9. Васильев, А. Ю. Информативность микро-КЛКТ в оценке эндодонтического лечения зубов (в эксперименте) // Васильев А. Ю., Петровская В. В. // IV Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники: Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 72–73.

10. Васильев, А. Ю. Микро-КТ как новая перспективная технология в стоматологии / Васильев А. Ю., Петровская В. В. // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – № 1 (9). – С. 62–63.

11. Васильев, А. Ю. Анализ информативности методик рентгеновской томографии в экспериментальном исследовании препаратов зубочелюстной системы / Васильев А. Ю., Потрахов Н. Н., Ничипор Е. А. и др. // VI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники: Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 59–62.

12. Васильев, А. Ю. Сравнительный анализ возможностей различных видов конусно-лучевой томографии в экспериментальном исследовании корневых каналов зубов до и после заполнения инородными материалами высокой плотности (часть 1) / Васильев А. Ю., Петровская В. В., Ничипор Е. А. и др. // Радиология – практика. – 2020. – № 5 (83). – С. 46–53.

13. Васильев, А. Ю. Сравнительный анализ возможностей различных видов конусно-лучевой томографии в экспериментальном исследовании корневых каналов зубов до и после заполнения инородными материалами

высокой плотности (часть 2) / Васильев А. Ю., Петровская В. В., Ничипор Е. А. и др. // Радиология – практика. – 2021. – № 2 (86). – С. 51–61.

14. Васильев, Ю. А. Цифровая микрофокусная технология рентгенографии в оценке анатомического строения зубов: экспериментальное исследование: Автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.01.13. СПб.: Воен.-мед. акад. им. С.М. Кирова, 2015. 23 с.

15. Гайворонский, И. В. Вариантная анатомия магистральных сосудов системы воротной вены и ее прикладное значение / Гайворонский И. В., Котив Б. Н., Коваленко Н. А. и др. // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». – 2018. – № 2. – С. 70–75.

16. Геращенко, С. М. Технология создания индивидуальных зубных имплантатов с развитой поверхностью / Геращенко С. М., Геращенко С. И., Карнаухов В. В. и др. // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2019. – № 1–2 (29–30). – С. 129–138.

17. Глушкова, Т. В. Клинический случай дисфункции биопротеза клапана сердца в трикуспидальной позиции у пациента дошкольного возраста: оценка вклада паннуса и кальцификации / Глушкова Т. В., Овчаренко Е. А., Батрагин А. В. и др. // Вестник трансплантологии и искусственных органов. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 45–53.

18. Глушкова, Т. В. Анализ причин дисфункций биопротезов клапанов сердца на примере дисфункции биопротеза «Юнилайн» / Глушкова Т. В., Овчаренко Е. А., Резвова М. А. и др. // Вестник трансплантологии и искусственных органов. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 75–83.

19. Грачев, Е. Ю. Средства и методы компьютерной микротомографии / Грачев Е. Ю., Козлов Е. А., Любушин В. С. и др. // Труды X всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур»: Сборник трудов. Том I. – Рязань, 2018. – С. 115–129.

20. Грязнов, А. Ю. О возможности получения фазо-контрастных изображений на микрофокусных источниках рентгеновского излучения / Грязнов А. Ю. // Биотехносфера. – 2010. – № 1 (7). – С. 30–32.

21. Джураева, Ш. Ф. Современная методика obturации и реставрации фронтальной группы зубов / Джураева Ш. Ф., Воробьев М. В., Гуцин В. В. и др. // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2018. – № 2. – С. 5–8.

22. Диаб, Х. М. Современный взгляд на методы лучевой диагностики, применяемые для определения положения электродной решетки при кохлеарной имплантации / Диаб Х. М., Васильев А. Ю., Соколова В. Н. // Вестник оториноларингологии. – 2017. – Т. 82. – № 6. – С. 77–80.

23. Дмитриенко, С. В. Совершенствование алгоритмов визуализации структур челюстно-лицевой области при использовании современных методов лучевой диагностики (часть I) / Дмитриенко С. В., Давыдов Б. Н., Доменюк Д. А. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 3 (84). – С. 56–58.

24. Дмитриенко, С. В. Совершенствование алгоритмов визуализации структур челюстно-лицевой области при использовании современных методов лучевой диагностики (часть II) / Дмитриенко С. В., Давыдов Б. Н., Доменюк Д. А. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 4 (85). – С. 59–61.

25. Долгалев, А. А. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии в эндодонтии (часть I). Анализ топографии корневых каналов / Долгалев А. А., Нечаева Н. К., Иванчева Е. Н. и др. // Эндодонтия Today. – 2017. – № 1. – С. 68–71.

26. Долгалев, А. А. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии в эндодонтии (часть II). Диагностика и оценка одонтогенных очагов деструкции челюстной кости / Долгалев А. А., Нечаева Н. К., Иванчева Е. Н. // Эндодонтия Today. – 2017. – № 2. – С. 69–73.

27. Доменюк, Д. А. Применение компьютерной микротомографии в изучении морфоструктурных особенностей твердых тканей зубов при ранних формах кариозных поражений / Доменюк Д. А., Чуков С. З.,

Анфиногенова О. И. и др. // Кубанский научный медицинский вестник. – 2018. – Т. 25. – № 6. – С. 57–67.

28. Доменюк, Д. А. Возможности микрокомпьютерной томографии в диагностике ранних форм кариеса жевательной поверхности постоянных моляров у детей. Часть I / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н. // Стоматология детского возраста и профилактика. – 2018. – Т. 18. – № 4 (67). – С. 61–64.

29. Доменюк, Д. А. Диагностические возможности конусно-лучевой компьютерной томографии при проведении краниоморфологических и краниометрических исследований в оценке индивидуальной анатомической изменчивости (часть I) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Дмитриенко С. В. и др. // Институт стоматологии. – 2018. – № 4 (81). – С. 52–55.

30. Доменюк, Д. А. Возможности микрокомпьютерной томографии в диагностике ранних форм кариеса жевательной поверхности постоянных моляров у детей. Часть II / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н. // Стоматология детского возраста и профилактика. – 2019. – Т. 19. – № 2 (70). – С. 4–12.

31. Доменюк, Д. А. Диагностические возможности конусно-лучевой компьютерной томографии при проведении краниоморфологических и краниометрических исследований в оценке индивидуальной анатомической изменчивости (часть II) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Дмитриенко С. В. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 1 (82). – С. 72–76.

32. Доменюк, Д. А. Особенности морфологии эмали постоянных зубов на этапах третичной минерализации (Часть I) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Порфириадис М. П. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 1 (82). – С. 104–106.

33. Доменюк, Д. А. Диагностические возможности конусно-лучевой компьютерной томографии при проведении краниоморфологических и краниометрических исследований в оценке индивидуальной анатомической изменчивости (часть III) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Дмитриенко С. В. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 2 (83). – С. 48–53.

34. Доменюк, Д. А. Особенности морфологии эмали постоянных зубов на этапах третичной минерализации (Часть II) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Порфириадис М. П. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 2 (83). – С. 104–107.

35. Доменюк, Д. А. Особенности морфологии эмали постоянных зубов на этапах третичной минерализации (Часть III) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Порфириадис М. П. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 3 (84). – С. 96–98.

36. Доменюк, Д. А. Особенности морфологии эмали постоянных зубов на этапах третичной минерализации (Часть IV) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Порфириадис М. П. и др. // Институт стоматологии. – 2019. – № 4 (85). – С. 108–110.

37. Доменюк, Д. А. Особенности морфологии эмали постоянных зубов на этапах третичной минерализации (Часть V) / Доменюк Д. А., Давыдов Б. Н., Порфириадис М. П. и др. // Институт стоматологии. – 2020. – № 1 (86). – С. 98–101.

38. Егорова, Д. О. Рентгенологическая оценка положения головок нижней челюсти при различных типах лица / Егорова Д. О., Арсенина О. И., Надточий А. Г. и др. // Стоматология. – 2020. – Т. 99. – № 1. – С. 55–60.

39. Ермекова, М. А. Микрофокусная рентгенография в диагностике болезни Осгуд-Шлаттера / Ермекова М. А., Алиякпаров М. Т. // Знание. – 2017. – № 3–1 (43). – С. 68–72.

40. Ершова, О. Ю. Конусно-лучевая компьютерная томография в оценке результатов лечения врожденных расщелин альвеолярного отростка / Ершова О. Ю., Блинов В. С., Карташов М. В. и др. // Проблемы стоматологии. – 2018. – Т. 14. – № 1. – С. 76–82.

41. Жамова, К. К. Метод микрофокусной цифровой маммографии с прямым многократным увеличением изображения: Автореф. дисс. ... канд. тех. наук: 05.11.17. СПб.: С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ), 2016. 17 с.

42. Жамова, К. К. Методика малодозовой микрофокусной цифровой маммографии / Жамова К. К., Грязнов А. Ю. // Радиология – практика. – 2016. – № 1 (55). – С. 24–31.

43. Задильская, К. Ю. Возможности современных томографических методик в визуализации суставного диска височно-нижнечелюстного сустава / Задильская К. Ю., Дергилев А. П., Манакова Я. Л. // Лучевая диагностика и терапия. – 2017. – № 2 (8). – С. 69.

44. Иванова, И. В. Возможности лучевых методов исследования в оценке эффективности хирургического этапа кохлеарной имплантации (клинико-экспериментальное исследование) / Иванова И. В., Макарова Д. В., Диаб Х. М. А. и др. // РМЖ. – 2018. – Т. 26. – № 3–2. – С. 48–52.

45. Клестова, И. А. Значение панорамной микрофокусной рентгенографии в оценке стоматологического статуса и идентификации личности у военнослужащих по призыву / Клестова И. А., Васильев А. Ю., Потрахов Н. Н. // Радиология – практика. – 2016. – № 4 (58). – С. 19–29.

46. Клышников, К. Ю. Компьютерное моделирование течения жидкости через биопротез клапана сердца / Клышников К. Ю., Овчаренко Е. А., Батрагин А. В. и др. // Математическая биология и биоинформатика. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 337–347.

47. Клышников, К. Ю. Моделирование процедуры транскатетерной имплантации клапана аорты / Клышников К. Ю., Ганюков В. И., Батрагин А. В. и др. // Математическая биология и биоинформатика. – 2019. – Т. 14. – № 1. – С. 204–219.

48. Козлова, М. В. Конусно-лучевая компьютерная томография при оценке архитектоники костной ткани челюстей / Козлова М. В., Белякова А. С., Арутюнян Б. А. // Кремлевская медицина. – 2017. – № 3. – С. 24–28.

49. Костромин, Б. А. Методы диагностики ранних изменений ВНЧС, связанных с окклюзией / Костромин Б. А., Лазарев С. А., Элибиев М. К. Р. и

др. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 9. – С. 144–148.

50. Лабис, В. В. Нано и микроразмерные частицы – новое звено в этиологии периимплантита / Лабис В. В., Базилян Э. А., Осташко А. А. и др. // Российский иммунологический журнал. – 2017. – Т. 11 (20). – № 2. – С. 162–165.

51. Левицкая, А. Д. Оценка микроструктуры и минеральной плотности очага искусственного кариеса эмали по данным рентгеновской компьютерной микротомографии / Левицкая А. Д., Сюткина Е. С., Гилева О. С. и др. // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. – №4. – С. 485–502.

52. Лехохин, Р. Р. Планирование дентальной имплантации с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии у пациентов с дефицитом костной ткани / Лехохин Р. Р., Филимонова Л. Б. // Клиническая стоматология. – 2018. – № 4 (88). – С. 36–37.

53. Лехнев, Д. А. МСКТ и КЛКТ в диагностике посттравматических дефектов и деформаций стенок орбит и контроле хирургического лечения с использованием имплантатов небиологического происхождения и костных трансплантатов / Лехнев Д. А., Давыдов Д. В., Костенко Д. И. // Второй Всероссийский конгресс по травматологии с международным участием Медицинская помощь при травмах: новое в организации и технологиях. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 50.

54. Лехнев, Д. А. Современные тенденции лучевой диагностики в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии (лекция) / Лехнев Д. А., Петровская В. В. // Радиология – практика. – 2019. – № 5 (77). – С. 57–73.

55. Мазуров, А. И. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине / Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. // Биотехносфера. – 2010. – № 4 (10). – С. 20–23.

56. Мазуров, А. И. Воспроизведение объемности исследуемых органов на микрофокусных рентгенограммах / Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. // Биотехносфера. – 2013. – № 4 (28). – С. 47–50.

57. Марков, А. А. Обоснование возможности применения титановых имплантатов с синтетическим биоактивным кальцийфосфатным минеральным покрытием, для профилактики миграции металлоконструкций в послеоперационном периоде у травматологических пациентов / Марков А. А. // II Международный конгресс ассоциации ревмоортопедов. – Москва, 2018. – С. 97–98.

58. Марков, А. А. Экспериментальное обоснование повышения биосовместимости синтетического биоактивного кальций-фосфатного минерального покрытия на титановых имплантатах / Марков А. А. // Медицинская наука и образование Урала. – 2018. – Т. 19. – № 1 (93). – С. 101–104.

59. Митронин, А. В. Использование компьютерной микротомографии для оценки качества эндодонтической обработки зуба при использовании современных инструментов / Митронин А. В., Собкина Н. А., Помещикова Н. И. и др. // Эндодонтия Today. – 2018. – № 1. – С. 22–26.

60. Михальченко, А. В. Диагностическая ценность двухмерных и трехмерных рентгенологических изображений / Михальченко А. В., Дьяченко С. В., Дьяченко Д. Ю. и др. // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2018. – № 1 (57). – С. 32–35.

61. Найданова, И. С. Возможности современных технологий в диагностике функциональных нарушений височно-нижнечелюстного сустава (обзор литературы) / Найданова И. С., Писаревский Ю. Л., Шаповалов А. Г. и др. // Проблемы стоматологии. – 2018. – Т. 14. – № 4. – С. 6–13.

62. Нечаева, Н. К. Планирование стоматологической имплантации на верхней челюсти с помощью конусно-лучевой томографии / Нечаева Н. К., Долгалев А. А. // Медицинский алфавит. – 2018. – Т. 2. – № 8 (345). – С. 44–47.

63. Ничипор, Е. А. Применение микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии в исследовании препарата нижней челюсти с металлическими конструкциями / Ничипор Е. А. // Сборник материалов XLI (41) Итоговой научной конференции молодых ученых МГМСУ имени А. И. Евдокимова. – Москва, 2019. – С. 151–152.

64. Ничипор, Е. А. Сравнительный анализ информативности методик компьютерной томографии в экспериментальном исследовании препарата нижней челюсти с металлическими конструкциями / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Алпатова В. Г. // Стоматология славянских государств: Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2019. – С. 261–263.

65. Ничипор, Е. А. Сравнительный анализ компьютерных томограмм при исследовании препаратов зубов и челюстей / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Алпатова В. Г. // Сборник материалов Юбилейной конференции, посвященной 65-летию кафедры лучевой диагностики. – Москва, 2019. – С. 51.

66. Ничипор, Е. А. Рентгеносемиотика инородных материалов в корневых каналах препаратов удаленных зубов по данным микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Алпатова, В. Г. и др. // VII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники: Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 68–73.

67. Ничипор, Е. А. Сравнение возможностей различных методик компьютерной томографии в исследовании препаратов зубочелюстной системы / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Алпатова В. Г. // Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – № 1 (S). – С. 50–51.

68. Ничипор, Е. А. Сравнение методик конусно-лучевой компьютерной томографии в экспериментальном исследовании препаратов удаленных зубов / Ничипор Е. А. // Сборник материалов XLII (42) Итоговой

научной конференции молодых ученых МГМСУ им. А. И. Евдокимова – Москва, 2020. – С. 228–229.

69. Ничипор, Е. А. Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография в исследовании препаратов зубов / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Алпатова В. Г. // Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов: Сборник тезисов конференции. – Москва, 2020. – С. 138–139.

70. Ничипор, Е. А. Идентификационные признаки эндодонтических материалов и фрагментов сломанных инструментов в каналах удаленных зубов по данным компьютерной томографии / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Лежнев Д. А. // Клиническая стоматология. – 2021. – № 1 (97). – С. 35–41.

71. Ничипор, Е. А. КЛКТ и микро-КЛКТ в экспериментальном исследовании препаратов удаленных зубов до и после пломбирования / Ничипор Е. А., Петровская В. В., Васильев А. Ю. // Российская стоматология. – 2021. – Т. 14. – №3. – С. 61–62.

72. Новожилова, Н. Е. Дифференциальная диагностика вертикальных трещин корня зуба с помощью КЛКТ: ретроспективное исследование (Differential diagnosis of vertical root fractures with the use of CBCT: a retrospective study) / Новожилова Н. Е., Быкова С. Ф., Макеева И. М., и др. // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2018. – Т. 8. – № 4. – С. 9–15.

73. Ободовский, А. В. Разработка и исследование технических средств микрофокусной рентгеновской томографии: дисс. ... канд. тех. наук: 05.27.02. СПб.: С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ), 2018. 135 с.

74. Овсянникова, Н. А. Определение тактики лечения корневых каналов зубов фронтальной группы на основании предшествующих данных традиционной рентгенографии и конусно-лучевой компьютерной томографии: сопоставительный анализ исходов / Овсянникова Н. А., Морозов А. Н., Попов П. А. и др. // Новые направления и концепции в

современной науке: Сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции. – Смоленск, 2019. – С. 8–10.

75. Овсянникова, Н. А. Планирование тактики лечения корневых каналов зубов фронтальной группы на основании предшествующих данных традиционной рентгенографии и конусно-лучевой компьютерной томографии: сопоставительный анализ осложнений / Овсянникова Н. А., Морозов А. Н., Попов П. А. и др. // Актуальные вопросы перспективных научных исследований: Сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Смоленск, 2019. – С. 17–19.

76. Овсянникова, Н. А. Повышение эффективности оценки системы корневых каналов зубов фронтальной группы на основе совершенствования подхода к диагностической визуализации / Овсянникова Н. А., Морозов А. Н., Попов П. А. // IV Международная научно-практическая конференция «European science of the future»: Сборник научных трудов. – Смоленск, 2019. – С. 8–10.

77. Овчаренко, Е. А. Прогнозирование результатов имплантации транскатетерного протеза клапана аорты на основе метода конечных элементов и данных микрокомпьютерной томографии / Овчаренко Е. А., Клышников К. Ю., Долгов В. Ю. и др. // Современные технологии в медицине. – 2016. – Т. 8. – № 1. – С. 82–92.

78. Овчаренко, Е. А. Оценка дисфункции биопротезов клапанов сердца методом микрокомпьютерной томографии / Овчаренко Е. А., Клышников К. Ю., Глушкова Т. В. и др. // Современные технологии в медицине. – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 15–22.

79. Петровская, В. В. Лучевая диагностика врожденных расщелин губы, нёба и альвеолярного отростка до и после костной аутопластики: автореф. дис. ... д-ра мед. наук: 14.01.13. М.: ГОУВПО «Московский государственный медико-стоматологический университет», 2016. 42 с.

80. Петровская, В. В. Возможности компьютерной томографии в определении структуры эндодонтического материала и качества лечения зубов (в эксперименте) / Петровская В. В., Васильев А. Ю., Ничипор Е. А. и др. // V Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники: Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 44–47.

81. Петровская, В. В. Анализ информативности конусно-лучевой компьютерной томографии в экспериментальном исследовании препарата нижней челюсти с металлическими конструкциями / Петровская В. В., Ничипор Е. А. // VI Межрегиональная научная конференция с международным участием «Байкальские встречи». Актуальные вопросы лучевой диагностики. – Иркутск, 2019. – С. 63–64.

82. Петровская, В. В. Конусно-лучевая компьютерная томография в анализе эндодонтического лечения зубов (в эксперименте) / Петровская В. В., Потрахов Н. Н., Васильев А. Ю. // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2019. – Т. 100. – № 2. – С. 89–94.

83. Потапова, Е. Г. Перспективы применения разных типов микроскопии и компьютерной томографии для анализа костно-мышечной системы головы / Потапова Е. Г. // Зоологические исследования. – 2018. – № 20. – С. 119–122.

84. Потрахов, Н. Н. Микрофокусная рентгенография в клинической практике: Монография / Потрахов В. В., Труфаенов Г. Е., Васильев А. Ю. и др. – СПб: ЭЛБИ-СПб, 2012. – 80 с.

85. Потрахов, Н. Н. Микрофокусная рентгенография в медицине: физико-технические особенности и современные средства рентгенодиагностики / Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю., Жамова К. К., и др. // Биотехносфера. – 2015. – № 5 (41). – С. 55–63.

86. Потрахов, Н. Н. Портативные технические средства рентгенодиагностики для стоматологии / Потрахов Н. Н., Потрахов Ю. Н. // Медицинская техника. – 2016. – № 6 (300). – С. 33–36.

87. Прокопович, Л. С. Адаптация клинических рекомендаций (протоколов лечения) для стоматологического приема при отборе и ежегодном профилактическом обследовании по инициативе работодателя лиц опасных профессий / Прокопович Л. С. // Российская стоматология. – 2019. – Т. 12. – № 1. – С. 36–41.

88. Разумова, С. Н. Особенности рентгеноконтрастности мта-содержащих цемента, по данным прицельной внутриротовой рентгенографии и КЛКТ / Разумова С. Н., Надточий А. Г., Браго А. С., и др. // Эндодонтия Today. – 2018. – № 1. – С. 77–79.

89. Рыбаков, А. С. Изолированная долея артериопортальная перфузия печени в эксперименте / Рыбаков А. С., Тягун В. С., Гайворонский И. В., и др. // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2018. – № 3 (63). – С. 180–184.

90. Сёмкин, В. А. Алгоритм рентгенологического обследования пациентов с воспалительно-деструктивными процессами кости в области корней моляров нижней челюсти / Сёмкин В. А., Надточий А. Г., Аржанцев А. П. и др. // Стоматология. – 2019. – Т. 98. – № 1. – С. 25–29.

91. Серик, А. Н. Диагностическая значимость конусно-лучевой компьютерной томографии в оценке состояния слезоотводящих путей / Серик А. Н., Светикова Л. А., Назарова Н. А. и др. // Военно-медицинский журнал. – 2018. – № 6. – С. 54–60.

92. Серова, Н. С. Лучевая диагностика остеонекроза нижней челюсти после лучевой терапии / Серова Н. С., Решетов И. В., Абрамов А. С. и др. // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2016. – Т. 97. – № 4. – С. 224–229.

93. Серова, Н. С. Лучевая диагностика одонтогенного верхнечелюстного синусита / Серова Н. С., Евсеева Е. В. // Вестник оториноларингологии. – 2017. – Т. 82. – № 2. – С. 46–50.

94. Собкина, Н. А. Анализ качества препарирования корневых каналов зубов эндодонтическими инструментами системы протейпер /

Собкина Н. А., Помещикова Н. И., Дмитриева Л. А. // Российская стоматология. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С.49–52.

95. Соколова, В. Н. Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография в эксперименте по оценке положения кохлеарного импланта / Соколова В. Н., Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю. и др. // Биотехносфера. – 2017. – № 4 (52) – С. 20–23.

96. Соловьева, О. А. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии в эндодонтии (часть III). Метод инструментальной обработки корневого канала зуба при наличии в нем отломка инструмента / Соловьева О. А., Винниченко Ю. А., Гоман М. В. и др. // Эндодонтия Today. – 2017. – № 3. – С. 29–33.

97. Соловьева, О. А. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии при создании эндодонтического доступа / Соловьева О. А., Винниченко Ю. А., Гоман М. В. и др. // Эндодонтия Today. – 2017. – № 4. – С. 24–28.

98. Староверов, Н. Е. Методы цифровой обработки медицинских микрофокусных рентгеновских изображений / Староверов Н. Е., Холопова Е. Д., Грязнов А. Ю. и др. // XIII Международная научная конференция с научной молодежной школой имени И. Н. Спиридонова «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Труды в 2 книгах. Книга I. – Владимир-Суздаль, 2018. – С. 84–87.

99. Староверов, Н. Е. Новые методы цифровой обработки микрофокусных рентгеновских изображений / Староверов Н. Е., Грязнов А. Ю., Потрахов Н. Н. и др. // Медицинская техника. – 2018. – № 6 (312). – С. 53–55.

100. Тарасенко, С. В. Интраоперационный микрофокусный рентгенологический контроль эффективности лечения пациентов с корневыми кистами челюстей / Тарасенко С. В., Серова Н. С., Морозова Е. А. // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 39–45.

101. Триголос, Н. Н. Сочетания с-образных корневых каналов в нижнечелюстных премолярах и вторых нижнечелюстных молярах между собой и со сложными каналами других зубов нижней челюсти по данным конусно-лучевой компьютерной томографии / Триголос Н. Н., Фирсова И. В., Македонова Ю. А. и др. // Эндодонтия Today. – 2017. – № 1. – С. 20–23.

102. Трубицын, А. А. Средства и методы компьютерной микротомографии / Трубицын А. А., Грачев Е. Ю., Морозов Д. А. и др. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 66–2. – С. 55–62.

103. Трутень, В. П. Рентгеноанатомия и рентгенодиагностика в стоматологии: Учебное пособие / Трутень В. П. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 256 с.

104. Трутень, В. П. Рентгенология: Учебное пособие / Трутень В. П. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 336 с.

105. Тягун, В. С. Анатомо-хирургические корреляции долевого строения печени и ее интраорганный артериальный русла / Тягун В. С., Гайворонский И. В., Суворов Д. А. и др. // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». – 2018. – № 3. – С. 69–74.

106. Фирсова, И. В. Особенности анатомии с-образных корневых каналов премоляров и вторых моляров нижней челюсти по данным конусно-лучевой томографии / Фирсова И. В., Македонова Ю. А., Триголос Н. Н., Ярошенко Н. Н. и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2018. – № 3. – С. 40.

107. Чибисова, М. А. Опыт проведения повторного эндодонтического лечения с использованием современных технологий / Чибисова М. А., Батюков Н. М., Савушкина Н. А. и др. // Институт стоматологии. – 2017. – № 3 (76). – С. 28–31.

108. Чибисова, М. А. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии на этапах ортопедического лечения / Чибисова М. А.,

Прохватилов О. Г., Батюков Н. М. // Институт стоматологии. – 2020. – № 1 (86). – С. 34–36.

109. Щербаков, Д. А. Диагностическая значимость конусно-лучевой компьютерной томографии, мультиспиральной компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии в диагностике грибкового тела околоносовых пазух / Щербаков Д. А., Кротова А. С., Малышева Т. Ю. и др. // Научно-практическая конференция «Современные аспекты хирургии головы и шеи»: Сборник трудов. – Тюмень, 2019. – С. 44–45.

110. Ahmed, H. M. A. A new system for classifying root and root canal morphology / Ahmed H. M. A., Versiani M. A., De-Deus G. et al. // International Endodontic Journal. – 2017. – V. 50. – № 8. – P. 761–770.

111. Aksoy, U. Publication trends in micro-CT endodontic research: a bibliometric analysis over a 25-year period / Aksoy U., Küçük M., Versiani M. A. et al. // International Endodontic Journal. – 2021. – V. 54. – № 3. – P. 343–353.

112. Apps, J. R. Imaging invasion: micro-CT imaging of adamantinomatous craniopharyngioma highlights cell type specific spatial relationships of tissue invasion / Apps J. R., Hutchinson J. C., Arthurs O. J. et al. // Acta neuropathologica communications. – 2016. – V. 4. – № 1. – P. 57.

113. Ashmawy, M. S. Detection of simulated vertical root fractures; which is better multi-detector computed tomography or cone beam computed tomography? / Ashmawy M. S., Yamany I., Abou-Khalaf A. et al. // The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine. – 2018. – V. 49. – № 1. – P. 60–65.

114. Bayram, H. M. Micro-computed tomographic evaluation of dentinal microcrack formation after using new heat-treated nickel-titanium systems / Bayram H. M., Bayram E., Ocak M. et al. // Journal of Endodontics. – 2017. – V. 43. – № 10. – P. 1736–1739.

115. Bohner, L. O. L. Comparative analysis of imaging techniques for diagnostic accuracy of peri-implant bone defects: a meta-analysis / Bohner L. O. L., Mukai E., Oderich E. et al. // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. – 2017. – V. 124. – № 4. – P. 432–440.

116. Boon, M. Morphometric analysis of explant lungs in cystic fibrosis / Boon M., Verleden S. E., Bosch B. et al. // *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. – 2016. – V. 193. – № 5. – P. 516–526.
117. Borofsky, M. S. Integration and utilization of modern technologies in nephrolithiasis research / Borofsky M. S., Dauw C. A. et al. // *Nature Reviews Urology*. – 2016. – V. 13. – № 9. – P. 549–557.
118. Candemil, A. P. Are metal artefact reduction algorithms effective to correct cone beam CT artefacts arising from the exomass? / Candemil A. P., Salmon B., Freitas D. Q. et al. // *Dentomaxillofacial Radiology*. – 2019. – V. 48. – № 3. – Article 20180290.
119. Castagnola, R. Micro-CT evaluation of two different root canal filling techniques / Castagnola R., Marigo L., Pecci R. et al. // *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*. – 2018. – V. 22. – № 15. – P. 4778–4783.
120. Chomet, M. Performance of nanoScan PET/CT and PET/MR for quantitative imaging of ^{18}F and ^{89}Zr as compared with ex vivo biodistribution in tumor-bearing mice / Chomet M., Schreurs M., Vos R. et al. // *EJNMMI Research*. – 2021. – V. 11. – № 120211. – Article 57.
121. Christen, P. In vivo visualisation and quantification of bone resorption and bone formation from time-lapse imaging / Christen P., Müller R. // *Current Osteoporosis Reports*. – 2017. – V. 15. – № 4. – P. 311–317.
122. Christiansen, B. A. Effect of micro-computed tomography voxel size and segmentation method on trabecular bone microstructure measures in mice / Christiansen B. A. // *Bone Reports*. – 2016. – V. 5. – P. 136–140.
123. Costa, E. D. Use of the metal artefact reduction tool in the identification of fractured endodontic instruments in cone-beam computed tomography / Costa E. D., Brasil D. M., Queiroz P. M. et al. // *International Endodontic Journal*. – 2020. – V. 53. – № 4. – P. 506–512.
124. da Silva Moura, W. Factors influencing the effective dose associated with CBCT: a systematic review / da Silva Moura W., Chiqueto K., Pithon G. M. et al. // *Clinical Oral Investigations*. – 2019. – V. 23. – № 3. – P. 1319–1330.

125. de Faria Vasconcelos, K. MicroCT assessment of bone microarchitecture in implant sites reconstructed with autogenous and xenogenous grafts: a pilot study / de Faria Vasconcelos K., dos Santos Corpas L., da Silveira B. M. et al. // *Clin Oral Implants Res.* – 2016. – V. 28. – № 28. – P. 308–313.

126. de Sousa-Neto, M. D. Root canal preparation using micro-computed tomography analysis: a literature review / de Sousa-Neto M. D., Silva-Sousa Y. C., Mazzi-Chaves J. F. et al. // *Brazilian Oral Research.* – 2018. – V. 32. – P. 20–43. – Article e66.

127. De-Deus, G. Root dentinal microcracks: a post-extraction experimental phenomenon? / De-Deus G., Cavalcante D. M., Belladonna F. G. et al. // *International Endodontic Journal.* – 2019. – V. 52. – № 6. – P. 857–865.

128. Demirturk Kocasarac, H. Evaluation of artifacts generated by titanium, zirconium and titanium-zirconium alloy dental implants in MRI, CT and CBCT images: A phantom study / Demirturk Kocasarac H., Ustaoglu G., Bayrak S. et al. // *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology.* – 2019. – V. 127. – № 6. – P. 535–544.

129. Diab, Kh. M. Microfocus X-ray at the surgical stage of cochlear implantation: experimental study / Diab Kh. M., Vasilyev A. Yu., Potrakhov N. N. et al. // *Modern Science.* – 2016. – № 11. – C. 76–81.

130. Evan, A. P. Discrepancy between stone and tissue mineral type in patients with idiopathic uric acid stones / Evan A. P., Coe F. L., Worcester E. M. et al. // *Journal of Endourology.* – 2020. – V. 34. – № 3. – P. 385–393.

131. Gao, Y. Remaining root dentin thickness in mesiobuccal canals of maxillary first molars after attempted removal of broken instrument fragments / Gao Y., Shen Y., Zhou X. et al. // *Australian Endodontic Journal.* – 2015. – V. 41. – № 3. – P. 122–127.

132. Hutchinson, J. C. Early clinical applications for imaging at microscopic detail: microfocus computed tomography (micro-CT) / Hutchinson J. C.,

Shelmerdine S. C., Simcock I. C. et al. // *British Journal of Radiology*. – 2017. – V. 90. – № 1075. – Article 20170113.

133. Irie, M. S. Use of micro-computed tomography for bone evaluation in dentistry / Irie M. S., Rabelo G. D., Spin-Neto R. et al. // *Brazilian Dental Journal*. – 2018. – V. 29. – № 3. – P. 227–238.

134. Jho, W. Comparison of root canal filling quality by mineral trioxide aggregate and gutta percha cones/AH plus sealer / Jho W., Park J.-W., Kim E. et al. // *Dental Materials Journal*. – 2016. – V. 35. – № 4. – P. 644–650.

135. Lacerda, M. F. L. S. Cleaning and shaping oval canals with 3 instrumentation systems: a correlative micro-computed tomographic and histologic study / Lacerda M. F. L. S., Marceliano-Alves M. F., Pérez A. R. et al. // *Journal of Endodontics*. – 2017. – V. 43. – № 11. – P. 1878–1884.

136. Leoni, G. B. Ex vivo evaluation of four final irrigation protocols on the removal of hard-tissue debris from the mesial root canal system of mandibular first molars / Leoni G. B., Versiani M. A., Silva-Sousa Y. T., et al. // *International Endodontic Journal*. – 2017. – V. 50. – № 4. – P. 398–406.

137. Liu, X. Evaluation of palatal furcation groove and root canal anatomy of maxillary first premolar: a CBCT and micro-CT study / Liu X., Gao M., Bai Q. et al. // *BioMed Research International*. – 2021. – V. 2021. – Article 8862956.

138. Lo, W.-L. Molecular Imaging and Preclinical Studies of Radiolabeled Long-Term RGD Peptides in U-87 MG Tumor-Bearing Mice / Lo W.-L., Lo S.-W., Chen S.-J. et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – V. 22. – № 11. – Article 5459.

139. Martins, J. N. R. Prevalence studies on root canal anatomy using cone-beam computed tomographic imaging: a systematic review / Martins J. N. R., Marques D., Silva E. J. N. L. et al. // *Journal of Endodontics*. – 2019. – V. 45. – № 4. – P. 372–386.

140. McClatchy, D. M. Calibration and analysis of a multimodal micro-CT and structured light imaging system for the evaluation of excised breast tissue /

McClatchy D. M., Rizzo E. J., Meganck J. et al. // *Physics in Medicine and Biology*. – 2017. – V. 62. – № 23. – P. 8983–9000.

141. McGuigan, M. B. An analysis of effective dose optimization and its impact on image quality and diagnostic efficacy relating to dental cone beam computed tomography (CBCT) / McGuigan M. B., Duncan H. F., Horner K. // *Swiss Dental Journal*. – V. 128. – № 4. – 2018. – P. 297–316.

142. Meng, Y. Microcomputed tomographic investigation of the trepan bur/microtube technique for the removal of fractured instruments from root canals without a dental operating microscope / Meng Y., Xu J., Pradhan B., Tan B. K. et al. // *Clinical Oral Investigations*. – 2020. – V. 24. – № 5. – P. 1717–1725.

143. Nardi, C. Head and neck effective dose and quantitative assessment of image quality: a study to compare cone beam CT and multislice spiral CT / Nardi C., Talamonti C., Pallotta S. et al. // *Dentomaxillofacial Radiology*. – 2017. – V. 46. – № 7. – Article number 20170030.

144. Neves, A. B. Mineral density changes in bovine carious dentin after treatment with bioactive dental cements: a comparative micro-CT study / Neves A. B., Bergstrom T. G., Fonseca-Gonçalves A. et al. // *Clinical Oral Investigations*. – 2019. – V. 23. – № 4. – P. 1865–1870.

145. Nichipor, E. A. Microfocus Cone-Beam Computed Tomography in an Experimental Study of Dental Filling Materials and Metal Fragments Inside the Root Canals of Extracted Teeth / Nichipor E. A., Petrovskaya V. V., Alpatova V. G. et al. // *AIP Conference Proceedings*. – 2021. – V. 2356. – Article 020017.

146. Ozcan, G. Evaluation of root canal morphology of human primary molars by using CBCT and comprehensive review of the literature / Ozcan G., Sekerci A. E., Cantekin K. et al. // *Acta Odontologica Scandinavica*. – 2016. – V. 74. – № 4. – P. 250–258.

147. Patel, S. Cone beam computed tomography in endodontics – a review of the literature / Patel S., Brown J., Pimentel T. et al. // *International Endodontic Journal*. – 2019. – V. 52. – № 8. – P. 1138–1152.

148. Petrovskaya, V. V. et al. Capabilities of the computed tomography in evaluation of endodontic material structure and dental treatment quality (an experimental study) / Petrovskaya V. V., Vasilyev A. Y., Nichipor E. A. et al. // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2089. – Article 020016.

149. Qiao, X. Performance of different imaging techniques in the diagnosis of head and neck cancer mandibular invasion: A systematic review and meta-analysis / Qiao X., Liu W., Cao Y. et al. // Oral Oncology. – 2018. – V. 86. – P. 150–164.

150. Ramos Brito, A. C. Detection of fractured endodontic instruments in root canals: comparison between different digital radiography systems and cone-beam computed tomography / Ramos Brito A. C., Verner F. S., Junqueira R. B. et al. // Journal of Endodontics. – V. 43. – № 4. – P. 544–549.

151. Rossi-Fedele, G. Assessment of root canal filling removal effectiveness using micro-computed tomography: a systematic review / Rossi-Fedele G., Ahmed H. M. A. // Journal of Endodontics. – 2017. – V. 43. – № 4. – P. 520–526.

152. Saati, S. Comparison of cone beam computed tomography and multi slice computed tomography image quality of human dried mandible using 10 anatomical landmarks / Saati S., Kaveh F., Yarmohammadi S. // Journal of Clinical and Diagnostic Research. – 2017. – V. 11. – № 2. – P. ZC13–ZC16.

153. Sarno, A. Cone-beam micro computed tomography dedicated to the breast / Sarno A., Mettivier G., Di Lillo F. et al. // Medical Engineering and Physics. – 2016. – V. 38. – № 12. – P. 1449–1457.

154. Siqueira, J. F., Jr. What happens to unprepared root canal walls: a correlative analysis using micro-computed tomography and histology/scanning electron microscopy / Siqueira J. F., Jr., Pérez A. R., Marceliano-Alves M. F. et al. // International Endodontic Journal. – 2018. – V. 51. – № 5. – P. 501–508.

155. Suguro, H. Microcomputed tomographic evaluation of techniques for warm gutta-percha obturation / Suguro H., Takeichi O., Hayashi M. et al. // Journal of Oral Science. – 2018. – V. 60. – № 2. – P. 165–169.

156. Torres, F. F. E. Evaluation of physicochemical properties of root-end filling materials using conventional and micro-CT tests / Torres F. F. E., Bosso-Martelo R., Espir C. G. et al. // *Journal of Applied Oral Science*. – 2017. – V. 25. – № 4. – P. 374–380.

157. Torres, F. F. E. Solubility, porosity and fluid uptake of calcium silicate-based cements / Torres F. F. E., Guerreiro-Tanomaru J. M., Bosso-Martelo R. et al. // *Journal of Applied Oral Science: Revista FOB*. – 2018. – V. 26. – e20170465.

158. Vasilyev, A. Y. et al. Comparative analysis of x-ray computed tomography techniques in an experimental study of anatomical preparations of the dentofacial system / Vasilyev A. Y., Potrakhov N. N., Nichipor E. A. et al. // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – V. 2250. – Article 020030.

159. Velozo, C. Microcomputed tomography studies of the effectiveness of XP-endo shaper in root canal preparation: a review of the literature / Velozo C., Albuquerque D. // *Scientific World Journal*. – 2019. – V. 2019. – Article 3570870.

160. Vidal, F. Odontogenic sinusitis: a comprehensive review / Odontogenic sinusitis: a comprehensive review / Vidal F., Coutinho T. M., Carvalho Ferreira D. D., et al. // *Acta Odontologica Scandinavica*. – 2017. – V. 75. – № 8. – P. 623–633.

161. Virta, J. X-ray microtomography is a novel method for accurate evaluation of small-bowel mucosal morphology and surface area / Virta J., Hannula M., Tamminen I. et al. // *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – № 11. – Article 13164.

162. Widmann, G. Ultralow dose MSCT imaging in dental implantology / Widmann G., Al-Ekrish A. A. // *Open Dentistry Journal*. – 2018. – V. 12. – № Suppl-1, M5. – P. 87–93.

163. Wolf, T. G. Root canal morphology and configuration of 123 maxillary second molars by means of micro-CT / Wolf T. G., Paqué F., Woop A.-C. et al. // *International Journal of Oral Science*. – 2017. – V. 9. – № 1. – P. 33–37.

164. Wolf, T. G. 3-dimensional Analysis and literature review of the root canal morphology and physiological foramen geometry of 125 mandibular incisors

by means of micro-computed tomography in a German population / Wolf T. G., Stiebritz M., Boemke N. et al. // *Journal of Endodontics*. – 2019. – V. 46. – № 2. – P. 184–191.

165. Xie, X. Dosimetry of cone-beam computed tomography and multi-slice computed tomography scanning for temporal bone / Xie X., Zhang Z., Wang Z. et al. // *National Medical Journal of China*. – 2018. – V. 98. – № 23. – P. 1837–1840.

166. Xu, T. Micro computed tomography assessment of apical accessory canal morphologies / Xu T., Tay F., Gutmann J. et al. // *Journal of Endodontics*. – 2016. – V. 42. – № 5. – P. 798–802.

167. Xu, T. Micro-computed tomography evaluation of the prevalence and morphological features of apical bifurcations / Xu T., Gao X., Fan W. et al. // *Journal of Dental Sciences*. – 2020. – V. 15. – № 1. – P. 22–27.

168. Zinelis, S. How Hedstrom files fail during clinical use? A retrieval study based on SEM, optical microscopy and micro-XCT analysis / Zinelis S., Al Jabbari Y. S. // *Biomedical Engineering Biomedizinische Technik*. – 2018. – V. 64. – № 2. – P. 225–231.

169. Zuolo, M. L. Micro-computed tomography assessment of dentinal micro-cracks after root canal preparation with TRUShape and self-adjusting file systems / Zuolo M. L., De-Deus G., Belladonna F. G. et al. // *Journal of Endodontics*. – 2017. – V. 43. – № 4. – P. 619–622.