

Leont'ev V. K. *Emal' zubov kak biokiberneticheskaja sistema.* — М.: GEOTAR-Media, 2016. — 72 s.

3. Литвинов С. Д. Наноразмерный композитный материал «ЛитАр» универсальный имплантат. — Самара: Книга, 2008 — 250 с.

Litvinov S. D. *Nanorazmernyj kompozitnyj material «LitAr» universal'nyj implantat.* — Samara: Kniga, 2008 — 250 s.

4. Митронин А. В., Прокопов А. А., Сребная Е. А., Привалов В. И. Предварительное изучение ротовой жидкости методом 1H и 13C ЯМР-спектроскопии // *Эндодонтия today.* 2016. № 3. С. 3–8.

Mitronin A. V., Prokopov A. A., Srebnaja E. A., Privalov V. I. *Predvaritel'noe izuchenie rotovoj zhidkosti metodom 1H i 13S JaMR-spektroskopii* // *Endodontija today.* 2016. №3. S. 3–8.

5. Митронин А. В., Прокопов А. А., Сребная Е. А., Привалов В. И. Возможности ЯМР13С-спектроскопии высокого разрешения для метаболического анализа ротовой жидкости // *Эндодонтия today.* 2016. №4. С. 12–15.

Mitronin A. V., Prokopov A. A., Srebnaja E. A., Privalov V. I. *Vozmozhnosti JaMR13S-spektroskopii vysokogo razreshenija dlja metabolicheskogo analiza rotovoj zhidkosti* // *Endodontija today.* 2016. №4. S. 12–15.

6. Пихур О. Л. Возрастные изменения состава и строения твёрдых тканей зуба взрослого человека: Дис. ... д-ра мед. наук. — СПб., 2015.

Pihur O. L. *Vozrastnye izmenenija sostava i stroenija tvjrdyh tkanej zuba vzroslogo cheloveka.* Dis. ... d-ra med. nauk. — SPb., 2015.

7. Duchemann B., Triba M. N., Guez D. et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopic analysis of salivary metabolome in sarcoidosis // *Sarcoidosis vasculitis and diffuse lung diseases.* 2016. Vol. 33. P. 10–16.

8. *Methodologies for metabolomics: experimental strategies and techniques* / ed. by N.W. Lut, J. Sweedler, R. Wevers. — Cambridge; New York: Cambridge univ. press, 2013. — 627 p.

9. Nosaka A., Fukutomy S., Uemura S. et al. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance study of healthy human saliva // *Archives Oral Biology.* 1998. Vol. 43. P. 341–346.

10. Zerihun, T. D., Farid, A., Rupasri, M., Ram, K., et al. The human saliva metabolome // *Metabolomics.* December. 2015. Vol. 11 (6). P. 1864–1883.

Применение микрокомпьютерной томографии в эндодонтическом исследовании

Подготовка этого материала была инициирована выступлением на XII Международном Конгрессе VDW GmbH «Революционные технологии в эндодонтическом лечении» в Москве, 29 сентября — 1 октября 2016 года уважаемого спикера Профессора Никола М. Гранде (был представлен совместный доклад с его коллегой — профессором Джанлуко Плотино, Италия).

При подготовке материала были использованы следующие источники:

1. Nicola M. Grande, Gianluca Plotino, Gianluca Gambarinia, Luca Testarelli, Ferdinando D'Ambrosio, Raffaella Pecci and Rossella Bedini — «3D DENTAL ANATOMY USING MICRO-CT — THE 3 Dimensional Micro — Tomography Analysis».

2. И.С. Разина, С.Г. Семенова, А.Г. Саттаров, И.Н. Мусин «Применение микротомографии для исследования новых материалов».

3. Васильев Ю.А. «Цифровая микрофокусная технология рентгенографии в оценке анатомического строения зубов (экспериментальное исследование)» (рукопись, экспериментальное исследование, диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук).

Представляем несколько значимых фрагментов из этих источников.

1. С помощью рентгеновского микрокомпьютерного томографа (Micro-CT), впервые разработанного в начале 1980-х годов, осуществляется неинвазивный и неразрушающий метод получения двух- и трехмерных изображений. Он позволяет получать данные с разрешением от десятков нанометров до миллиметров, причем принципы, заложенные в его создании и реализацию (инженерно-физические, конструктивные, программные и др.) — постоянно развиваются и совершенствуются.

2. Сегодня исследования с помощью микрокомпьютерной томографии — достаточно новые и универсальные. Они являются представительными методами для изучения объемного строения практически любых материалов и объектов. Результаты пространственного изучения с помощью Micro-CT могут быть как дополнительными данными к существующим традиционным показателям, так и являться поставщиком новейшей, недоступной ранее информации.

3. Сфера применения Micro-CT — от инженерии до машиностроения, от кристаллографии до нефтяной промышленности, от палеонтологии, археологии до современной геологии при исследовании горных пород, от микроэлектроники до электронной промышленности, от микробиологии до анатомии и медицины, от наноматериалов до композитов и изделий из них; при изучении биологических материалов в медицине и в других областях.

4. При помощи микрокомпьютерной томографии можно достичь разрешающей способности в несколько микрон или даже в несколько сот нанометров (micro-CT с разрешающей способностью на уровне сотен нанометров условно называется нанотомографией). Наивысшую разрешающую способность, превышающую один микрон, целесообразно применять на объектах, величина которых не превышает нескольких миллиметров. Недеструктивным методом с использованием Micro-CT исследуются внутреннее строение как органических, так и неорганических тканей, при этом программно устанавливается разрешающая способность, сопоставимая с оптическим микроскопом.

5. Сегодня исследования в стоматологии с использованием рентгеновских лучей Micro-CT очень перспективны, и в частности эти исследования являются одними из самых больших достижений в области эндодонтии.

6. Исследования с использованием рентгеновского излучения Micro-CT — это неразрушающий метод визуализации трехмерной внутренней микроструктуры объектов, выявления особенностей строения корневых каналов (перешейки, апикальные дельты, дополнительные каналы, каналы различной сложной формы — с поднутрениями, с изгибами и разветвлениями и др.). Метод аналогичен медицинской томографии, но обладает значительно более высоким пространственным разрешением. При сканировании визуализируется вся внутренняя трехмерная архитектура объекта, при этом образец полностью сохраняется для других видов исследований.

7. Micro-CT, использующий рентгеновские лучи, на данный момент своего развития не подходит для естественного клинического исследования на людях из-за радиационного воздействия; он может становиться только мощным инструментом для изучения, анализа, сравнения, обмена знаниями и рекомендаций обуча-

оющимися. Применение методики ограничивается лабораторными исследованиями тканей, клеток или частей органов. Атравматичная техника 3D-оценки системы корневых каналов зубов позволяет проводить количественный и качественный анализ анатомии; операционных методов, применяемых во время эндодонтических манипуляций; оценивать способность и эффективность стоматологических материалов, связанных с эндодонтическим лечением и пр. Данная технология позволяет анализировать корневые каналы перед, во время и после эндодонтической инструментировки; одновременно или отдельно изучать, демонстрировать и исследовать внутреннюю и внешнюю анатомию зуба, предоставляя подробные информативные изображения. Технология позволяет улучшить преคลินิกское обучение в фундаментальных процедурах эндодонтического лечения (изучать особенности инструментальной обработки).

8. Одна из главных задач рентгеновской микрофотографии — исследование минерального вещества для получения генетической и технологической информации, получение данных о морфоструктурных характеристиках — качественных и количественных.

9. Описание метода

Метод компьютерной микрофотографии аналогичен медицинской томографии. Микрофокусная рентгеновская трубка освещает объект, а рентгеновская камера получает его увеличенные теневые проекции. На основе сотен проекций, собранных под разными углами при вращении объекта (или вращения платформы, на которой он закреплен) оператор реконструирует набор виртуальных срезов (срезов) объекта, превращая их в цифровое 3D-изображение. Воксель Micro-CT (воксель — *volume pixel — voxel — объемный пиксель, представляющий собой в общем случае параллелепипед; кстати, кроме обычных вокселей существуют еще и доксели — doxel — dynamic voxel, изменяющийся во времени воксель*) — Micro-CT обеспечивается в диапазоне 5–50 мкм³ (современные модели есть и с более качественными характеристиками). Параметр осевого шага сканирования может быть предварительно установлен с помощью программного обеспечения. Эта регулировка определяет разрешение получаемого изображения, а также — влияет на время экспозиции (меньший размер вокселя формирует изображение с более высоким разрешением). При уменьшении шага сканирования — требуется большее время для рентгеновского облучения. Кроме того, увеличение числа полученных изображений требует и большего объема памяти в компьютере для хранения данных. Оператор может просматривать сечение за сечением, получать сечения (срезы) под любыми углами, получать числовые характеристики трехмерной внутренней микроструктуры по всему объему или выделенной области, создавать реалистичные трехмерные модели микроструктуры для виртуального перемещения внутри объекта исследования. Micro-CT позволяет повторное сканирование и манипулирование изображением с помощью специального программного обеспечения.

Принципы и методы восстановления и анализа изображений исследуемых объектов, воплощенных в системе Micro-CT, постоянно совершенствуются разработчиками; томографы делятся условно на 4 группы — рентгеновская микрофотография, рентгеновская нанотомография, микрофотография *in vivo*, системно объемное элементное картирование.

10. Итальянские доктора Nicola M. Grande, Gianluca Plotino, Gianluca Gambarini, Luca Testarelli, Ferdinando D'Ambrosio, Raffaella Peccic and Rossella Bedini провели анализ с использованием Micro-CT («3D DENTAL ANATOMY USING MICRO-CT — THE 3 Dimensional Micro — Tomography Analysis»), используя настольный

рентгеновский сканер КТ микроцентра (*SkyScan 1072, SkyScan bvba, Aartselaar, Бельгия*) с программным обеспечением ResolveRT Amira. (*Бельгийская компания SkyScan была основана в 1996 году. Первым прибором, представленным на рынке, был микро-КТ-сканер с микронным разрешением. В 2005 году компания стала единственным в мире производителем лабораторных nano-КТ-сканеров с субмикронным разрешением.*)

В ходе проведенных исследований учеными были получены трехмерные изображения 15 удаленных зубов, при этом удалось точно визуализировать и проанализировать внешнюю и внутреннюю анатомию зубов, показав мельчайшие детали, в т.ч.: первые моляры со вторым каналом в медиально-щечном (МВ) корне; первые моляры со сложной анатомией в среднем корне; премоляры с единичным и двойными корнями и с осложненной апикальной анатомией. Среди 5 верхних проанализированных моляров — в трех случаях, каналы МВ объединялись в один канал, в то время как в других двух молярах два средних канала были отдельными. Среди нижних моляров два из этих пяти образцов показали единственный канал в среднем корне, у которого было широкое, плоское появление в мезиодистальном измерении. В пяти зубах премоляра каналы были независимыми; однако апикальная трехгранная поверхность и разветвления корневых каналов были довольно сложны.

11. Для исследования биологических тканей, биологических аспектов в предупреждении развития заболеваний важны принципиально различные способности ослабления рентгеновских лучей, разные диапазоны рабочих энергий (уровень радиационного воздействия); разные эффекты взаимодействия с испытуемым веществом во время выполнения эндодонтических этапов; технические решения, связанные с геометрией сканирования.

12. Применение микрофотографии в эндодонтическом исследовании включают анализ внутренней анатомии зубов, архитектуру корневой системы, а также — особенностей окружающих костных тканей. Возможно отслеживание и наблюдение реакции тканей пульпы (или ее поражения) и периапикальных тканей на кариозный процесс и на лечение, на процессы заживления дефектов. В исследованиях, проведенных Ю.А. Васильевым, наглядно демонстрирована апикальная дельта канала мезиобуккального корня верхнего моляра и др.

13. Сложность системы корневого канала всегда была проблемой для исследований в области эндодонтии. (*Исторически значимое исследование было выполнено еще в 1925 г. Вальтером Гессом, который исследовал корневые каналы с использованием определенных чернил, визуализировал огромную сумму переменных и сложности систем корневого канала, опубликовав первый обширный отчет об этом эксперименте.*) Успех эндодонтического лечения напрямую связан с выявлением всех корневых каналов для их качественной очистки. Анализ внутренней анатомии имеет важное значение для познания сложности системы корневых каналов и планирования лечения. Благодаря проводимым исследованиям с использованием Micro-CT можно судить, насколько применяемые методы обработки каналов улучшают степень удаления инфекции из корневого канала, степень герметизации применяемыми материалами, качество obturации, проникновение микроорганизмов в заапикальную зону (основная причина возникновения периодонтитов).

Это способствует лучшему преคลินิกскому пониманию и обучению докторов фундаментальным процедурам эндодонтического лечения.