

Д. А. ДОМЕНЮК¹, С. З. ЧУКОВ¹, О. И. АНФИНОГЕНОВА², И. В. РЖЕПАКОВСКИЙ²,
О. О. ИВАНЮТА¹

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ В ИЗУЧЕНИИ МОРФОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТВЁРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ ПРИ РАННИХ ФОРМАХ КАРИОЗНЫХ ПОРАЖЕНИЙ

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Мира, д. 310, Ставрополь, Россия, 355017.

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355002.

АННОТАЦИЯ

Цель. Оценить возможности метода микрокомпьютерной томографии с последующим анализом изображения и определением минеральной оптической плотности деминерализованных участков для совершенствования ранней диагностики фиссурного кариеса постоянных моляров после прорезывания.

Материалы и методы. С использованием высокоразрешающего рентгеновского микротомографа «Skyscan 1176» («Bruker», Belgium), с последующей постобработкой и анализом полученных томограмм, исследованы 75 удалённых по ортодонтическим показаниям моляров детей в возрастной категории 8-11 лет. Из общего числа удалённых зубов сформированы группы исследований – зубы без признаков деминерализации, и зубы с кариозными поражениями в стадии белого, светло-коричневого, коричневого, чёрного пятен. На реконструированных 2D и 3D изображениях идентифицированы зоны во внешней (0,05-0,5 мм), средней (0,75-1,25 мм) и внутренней (1,5-2,0 мм) трети толщины эмалевого слоя с последующим вычислением в программе СТvox (3.3.0r1403, Bruker-microCT) усреднённых показателей рентгенологической (минеральной) плотности.

Результаты. По томограммам зубов исследуемых групп установлены усреднённые показатели минеральной оптической плотности эмали интактных зубов, а также зубов, имеющих различные виды кариозных поражений в пределах эмали. В порядке убывания параметров оптической плотности выявлена следующая последовательность: здоровая эмаль ($2,47 \pm 0,12$ г/см³) – кариес в стадии белого пятна ($2,41 \pm 0,11$ г/см³) – кариес в стадии светло-коричневого пятна ($2,32 \pm 0,07$ г/см³) – кариес в стадии коричневого пятна ($2,18 \pm 0,12$ г/см³) – кариес в стадии чёрного пятна ($1,81 \pm 0,12$ г/см³). Выявление корреляционных связей между цветом кариозного поражения и минеральной плотностью зубной эмали расширяет понимание механизмов развития патогенеза кариеса, и способствует совершенствованию лечебно-профилактических мероприятий, направленных на повышение кариесрезистентности.

Заключение. Применение метода микрокомпьютерной томографии, в комплексе с другими специальными методами, характеризует фиссурный кариес как последовательный, постепенно прогрессирующий деструктивный процесс твёрдых тканей зуба (от очаговой деминерализации до формирования полости), устанавливающий зависимость между интенсивностью внутренних нарушений и внешними разрушениями.

Ключевые слова: микрокомпьютерная томография, минеральная оптическая плотность, фиссурный кариес, деминерализация эмали, морфология эмали

Для цитирования: Доменюк Д.А., Чуков С.З., Анфиногенова О.И., Ржепаковский И.В., Иванюта О.О. Применение компьютерной микротомографии в изучении морфоструктурных особенностей твёрдых тканей зубов при ранних формах кариозных поражений. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2018; 25(6): 57-67. DOI: 10.25207 / 1608-6228-2018-25-6-57-67

For citation: Domenyuk D.A., Chukov S.Z., Anfinogenova O.I., Rzhepakovsky I.V., Ivanyuta O.O. Application of computer microtomography in the study of morphostructural peculiarities of hard tissues of teeth in early forms of carious lesions. *Kubanskij nauchnyj medicinskij vestnik*. 2018; 25(6): 57-67. (In Russ., English abstract). DOI: 10.25207 / 1608-6228-2018-25-6-57-67

D. A. DOMENYUK¹, S. Z. CHUKOV¹, O. I. ANFINOGENOVA², I. V. RZHEPAKOVSKY², O. O. IVANIUTA¹

APPLICATION OF COMPUTER MICROTOMOGRAPHY IN THE STUDY OF MORPHOSTRUCTURAL
PECULIARITIES OF HARD TISSUES OF TEETH IN EARLY FORMS OF CARIOUS LESIONS

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Stavropol State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Mira str., 310, Stavropol, Russia, 355017.

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University", Pushkin str., 1, Stavropol, Russia, 355002.

ABSTRACT

Aim. The research was designed to assess the capabilities of the microcomputer tomography method with the subsequent image analysis and determination of the mineral optical density of demineralized areas to improve the early diagnosis of fissure caries of permanent molars after the eruption.

Materials and methods. Using a high-resolution X-ray microtomograph "Skyscan 1176" ("Bruker", Belgium) followed by post-processing and analysis of the obtained tomograms, 75 molars of children aged 8-11 were removed by orthodontic indications. Of the total number of teeth removed, research groups were formed – teeth without signs of demineralization and teeth with carious lesions in the stage of white, light brown, brown and black spots. In the reconstructed 2D and 3D images were identified the zones in the outer (0.05-0.5 mm), middle (0.75-1.25 mm) and inner (1.5-2.0 mm) thirds of the thickness of the enamel layer followed by the computation in the CTvox program (3.3.0-1403, Bruker-micro CT) of the averaged X-ray (mineral) density indicators.

Results. According to the tomograms of the teeth of the studied groups, the average indicators of the mineral optical density of the intact teeth enamel were identified as well as the average indicators of teeth with various types of carious lesions within the enamel. The following sequence was revealed in descending order of the parameters of optical density: healthy enamel (2.47 ± 0.12 g/cm³) – caries in the white spot stage (2.41 ± 0.11 g/cm³) – caries in the light brown spot stage (2.32 ± 0.07 g/cm³) – caries in the brown spot stage (2.18 ± 0.12 g/cm³) – caries in the black spot stage (1.81 ± 0.12 g/cm³). Identifying the correlations between the color of carious lesion and mineral density of tooth enamel broadens the understanding of the mechanisms of the development of caries pathogenesis and contributes to the improvement of therapeutic and preventive measures aimed at improving caries resistance.

Conclusion. The use of microcomputer tomography in combination with other special methods characterizes fissure caries as a sequential, gradually progressing destructive process of hard tooth tissues (from focal demineralization to cavity formation), which establishes the relationship between the intensity of internal disturbances and external damage.

Keywords: microcomputer tomography, mineral optical density, fissure caries, enamel demineralization, enamel morphology

Введение

Проблемы углублённого изучения патогенеза и ранней диагностики кариеса зубов в детском (подростковом) возрасте продолжают оставаться одними из актуальных и полностью неразрешённых задач современной стоматологической науки, так как незавершённость процессов минерализации твёрдых тканей после прорезывания значительно повышает риск возникновения кариозных поражений [1, 2, 3, 4].

Раннее выявление начальных форм кариеса у детского населения при сохранности поверхностного слоя и органической эмалевой матрицы, являющейся зоной нуклеации для роста кристаллов гидроксиапатитом, в комплексе с адекватной реминерализующей терапией, способствует усилению процессов реминерализации с последующим приостановлением (замедлением) развития кариозного поражения [5, 6, 7].

Фиссурный кариес, занимающий лидирующие позиции в структуре кариозных поражений зубов, возникает сразу после прорезывания зубов. Доказано наличие прямой корреляционной зависимости между риском возникновения фиссурного кариеса и исходной степенью минерализации зубной эмали [8, 9].

К числу востребованных и требующих своего разрешения, относятся вопросы, касающиеся разработки и совершенствования методов диагностики фиссурного кариеса постоянных зубов после прорезывания у детей. Противоречивость имеющихся клиничко-диагностических данных об-

условлена с одной стороны, трудностью выявления начальных форм кариозных поражений, из-за специфики анатомической конфигурации и архитектоники жевательной поверхности прорезывавшегося зуба (особенность морфологии строения фиссур; преобладание гипоминерализованных участков над минерализованными; более длительный период гипоминерализации жевательной поверхности в сравнении с гладкими поверхностями зуба; значительная глубина фиссур в условиях гипоптороза; аккумуляция пищевых остатков; ретенция микроорганизмов в ямочно-фиссурных зонах с формированием агрессивной зубной бляшки; невозможность физиологической минерализации эмали; постоянное наличие кариесогенных бактерий и легко усвояемых углеводов в ротовой полости), с другой – несогласованностью стандартизированных оценочных критериев при морфологических исследованиях [10, 11].

Среди базовых клинических методов диагностики кариеса используются визуальные и тактильные исследования. Разработанные для визуальной диагностики фиссурного кариеса критерии, с учётом внешнего вида кариозных поражений, позволяют с различной степенью вероятности спрогнозировать глубину деминерализации твёрдых тканей зуба (Ekstrand K., 1998). Метод зондирования, как наиболее часто используемый способ определения фиссурного кариеса, вследствие малой чувствительности, низкой специфичности, возможности образования полостей из-за травматических повреждений эмали, не являет-

ся эффективным способом ранней диагностики. Из дополнительных методов выявления начальных стадий окклюзионного кариеса, классическая рентгенография показала свою несостоятельность ввиду существенной толщины здоровой эмали, препятствующей адекватному контрастированию. Диагностика фиссурного кариеса возможна только при распространении поражения за эмалево-дентинное соединение. Для определения фиссурного кариеса интерпроксимальную (bitewing) рентгенографию используют в качестве дополнения к визуальному исследованию, т.к. она помогает установить только полостной кариес дентина. Для качественной рентгенодиагностики фиссурного кариеса необходима прикусная проекция и устройства направления луча (beam-aiming device), позволяющие минимизировать перекрытия зубов. Также важно соблюдать время и дозу действия рентген излучения, способ проявления и качества плёнки и т.д. Согласно рекомендациям European Association of Pediatric Dentistry (2014), первое рентгеновское обследование детей проводят в 5-6 лет, следующее – через 3 года. При необходимости экстренного рентгеновского обследования (по клиническим показаниям), для уменьшения лучевой нагрузки используют плёнку с повышенной чувствительностью или цифровую рентгенодиагностику. Цифровая рентгенограмма имеет небольшую значимость в диагностике раннего фиссурного кариеса т.к. контрастное изображение доступно только с помощью компьютерной программы на экране монитора. Ограниченные возможности метода лазерной флуоресценции с помощью прибора DIAGNOdent («KaVo Dental», GmbH, Германия) при выявлении первичных дефектов эмали (D.1.1, D.1.2) обусловлены тем, что ранние поражения эмали не дают прироста интенсивности флуоресценции. Значительное увеличение флуоресцирования отмечается на более поздних стадиях развития кариеса (D.2, D.3, D.4), что связано со структурой и активностью бактерий, диффундирующих в окружающие твёрдые ткани, и концентрации продуктов их метаболизма (уровня инфицирования). Доказано, что наибольший вклад в эффективность диагностики вносит порфирин, активно флуоресцирующий именно под воздействием красного света. Авторы отмечают, что система DIAGNOdent, отличающаяся хорошей чувствительностью и селективностью, позволяет эффективно выявлять именно кариозные поражения (дефекты), однако при этом имеется высокая вероятность ложно-положительного диагноза [12, 13, 14].

Применение количественной лазер-индуцированной флуоресценции (Quantitative Light-induced Fluorescence, QLF), основанной на регистрации флуоресценции в ответ на коротковолновой возбуждающий импульсный световой поток ($\lambda=488$ нм), эффективно при выявлении деминерализации в пределах эмали. Использование QLF не

позволяет диагностировать кариес, ограниченный эмалью и проникающий в дентин, т.к. глубина распространения кариозного поражения в дентин не коррелирует с интенсивностью флуоресценции. Также, QLF не способен дифференцировать гипоплазию от кариозного поражения. При этом QLF имеет высокую специфичность (0,79-0,81), чувствительность (0,72-0,76) в диагностике кариеса дентина, дентального налёта и камня. Использование метода волоконно-оптической трансиллюминации (Fiber-optic transillumination, FOTI), как дополнительного для выявления апроксимального кариеса, так же не позволяет выявлять ранние кариозные поражения в пределах эмали. При диагностике фиссурного кариеса, метод FOTI имеет точность, аналогичную визуальному осмотру. Возможности цифровой волоконно-оптической трансиллюминации (Digital imaging fiber-optic transillumination, DIFOTI), являющейся цифровой модификацией системы FOTI, позволяют определять исключительно поверхностные размеры дефектов, но не глубину поражения. Система DIFOTI, позволяющая сохранять готовые снимки, имеет более высокую чувствительность, в сравнении с классической рентгенографией, при выявлении фиссурного, апроксимального кариеса и кариеса гладких поверхностей, при этом его специфичность незначительно ниже рентгенографии. Метод определения электрической проводимости (Electrical conductance), основанный на способности кариозных тканей зубов проводить ток различной величины, в зависимости от выраженности структурных изменений деминерализованных твёрдых тканей зубов, не позволяет различить деминерализованные и незрелые (гиподеминерализованные) фиссуры. Невысокая воспроизводимость электрометрии, в сравнении с другими системами измерений, связана с вариацией проводимости, которая обусловлена изменяющейся степенью дегидратации зуба или увлажнением его поверхности. При этом чувствительность электрометрии в выявлении окклюзионного кариеса составляет 93% с общей точностью 83% при относительно низких (77%) показателях специфичности [15, 16, 17].

В связи со статичностью (неподвижностью) объектов исследования (зубы с различной степенью деминерализации), а также отсутствием лимита радиационной нагрузки, высокоразрешающую, диагностически точную 3D реконструкцию с возможностью визуализацией всей внутренней трёхмерной структуры объекта при полном сохранении образца, можно получить с использование метода микрокомпьютерной томографии (микро-КТ). В современной отечественной и зарубежной научно-исследовательской и медицинской практике, метод микро-КТ с последующей постобработкой и анализом полученных томограмм, вызывает обоснованный интерес не только у клиницистов, но и у специалистов, изучающих вопросы

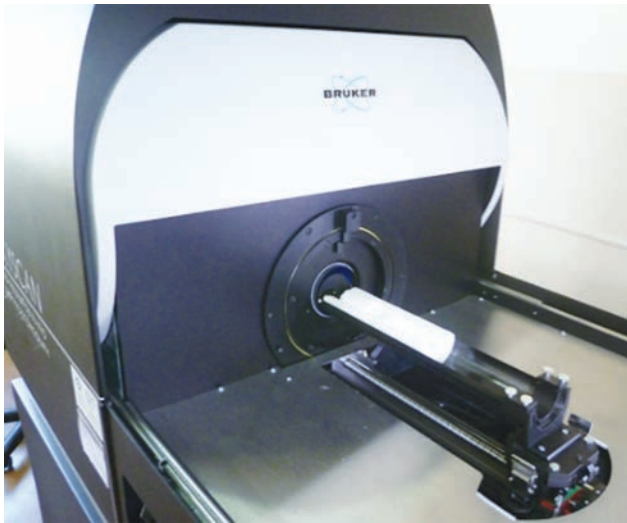


Рис. 1. Высокорастворяющий рентгеновский микротомограф «Skyscan 1176» («Bruker»).

Fig. 1. High resolution X-ray microtomograph «Skyscan 1176» («Bruker»).

морфологии человека и животных в норме, и при патологических состояниях. Внедрение данного метода (подхода) доказало свою состоятельность при решении задач реконструкции прецизионных биологических моделей (анатомических структур) с последующим компьютерным моделированием и исследованием имплантированных объектов в биологические ткани [18-22].

Кариесологи, опираясь на результаты химического и рентгеноструктурного анализа, в зависимости от степени деминерализации твёрдых тканей зубов (от меньшего к большему), установили цветовую кодировку минеральной плотности в следующей последовательности: белое, светло-коричневое, коричневое, чёрное пятно [23].

Несмотря на опубликованные работы отечественных и зарубежных авторов по изучению форм фиссурного кариеса у детей в период сменного (постоянного) прикуса, с учётом макро- и микроскопических, гистологических, рентгенологических исследований, сведения о применении метода микрокомпьютерной томографии в диагностике и патофизиологических особенностях течения ранних форм кариозных поражений постоянных моляров, единичны и имеют разрозненный характер, что и послужило целью настоящего исследования.

Цель исследования: оценить возможности метода микрокомпьютерной томографии с последующим анализом изображения и определением минеральной оптической плотности деминерализованных участков для совершенствования ранней диагностики фиссурного кариеса постоянных моляров после прорезывания.

Материалы и методы

Перед проведением исследований с участием детей получено заключение Комитета по биоэтике и информированные добровольные согласия родителей (попечителей, опекунов). Результаты этической экспертизы подтвердили соответствие

протоколов исследований международным и российским нормативно-правовым документам: Хельсинской Декларации Всемирной Медицинской Ассоциации (World Medical Association Declaration of Helsinki, 1964) «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками LXIV Генеральной Ассамблеи WMA (2013г.); ст. 24 Конституции РФ; «Правил клинической практики в РФ» (Приказ Минздрава РФ № 266 от 19.06.2003); этических стандартов Комитета по экспериментам, стандартам проведения клинических исследований (ГОСТ Р 52379-2005); Федерального закона РФ № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в РФ» (от 21.11.2011).

Работа выполнена на базе межкафедральной научно-образовательной лаборатории экспериментальной иммуноморфологии, иммунопатологии и иммунобиотехнологии Института живых систем Северо-Кавказского федерального университета.

Для изучения структуры зубов использовали высокоразрешающий рентгеновский микротомограф «Skyscan 1176» («Bruker», Kartuizersweg, Kontich, Belgium) (рис. 1).

Среди наиболее значимых преимуществ микрокомпьютерной томографии следует выделить следующие: возможность создания трёхмерного (3D) микроскопического изображения морфологии изучаемого объекта, его внутренней микроструктуры (микротекстуры) при субмикронном разрешении; выявление участков патологически изменённых тканей и их характеристика; прижизненная динамическая оценка развития патологии и эффективности проводимой терапии на лабораторных животных в режиме реального времени без необходимости проведения эвтаназии в любых контрольных точках эксперимента; изучение фармакологической динамики *in-vivo*; визуализация биолюминесцентных и биохимических изменений в живых клетках экспериментальных животных; скрининг PET (positron emission tomography) и СПЕКТ (single photonemission computed tomography) проб; применение, разработка и подтверждение (валидация) проб и биологических маркёров; отслеживание миграции клеток в условиях *in-vitro* и *in vivo*; соблюдение международных нормативно-правовых стандартов, принципов нравственности по гуманному обращению с животными.

При реализации метода микро-КТ применялась схема использования рентгеновского аппарата с малым размером фокального пятна, причём полезная форма рентгеновского излучения представлена конусом. Схема микро-КТ-сканирования: микрофокусная рентгеновская трубка освещает объект, а рентгеновская камера получает его увеличенные теневые проекции. На основе тысяч проекций, собранных под разными углами при вращении объекта, компьютер реконструирует набор виртуальных сечений объекта. Оператор может просматривать срез за срезом, получать срезы под любым углом и

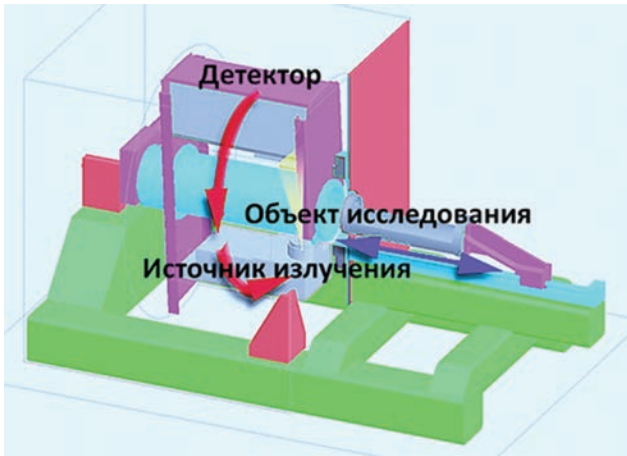


Рис. 2. Схема микро-КТ сканирования с применением острофокусного конического пучка.

Fig. 2. The scheme of a micro CT scan using a high-precision conical beam.

числовые характеристики трёхмерной внутренней микроструктуры по всему объёму или выделенной области исследования. Усовершенствованная конструкция сочетает подвижный объектный столик и рентгеновскую камеру, позволяя достигнуть высокого разрешения, удобства размещения крупных образцов, увеличения скорости сканирования. Использование изменяемой геометрии сканирования в микро-КТ значительно увеличивает скорость, сохраняет высокое разрешение, по сравнению с приборами, использующими фиксированную систему «источник-детектор» (рис. 2).

Параметры сканирования в Skyscan 1176 control program (10.0.0.0, Bruker-microCT, Бельгия): X-ray voltage 90 kV, X-ray current 270 μ A, filter Cu 0,1 mm, image pixel size 8,77 μ m, camera resolution setting high (4000-pixel field width), tomographic rotation 180°, rotation step 0,3.

Сканированные объекты реконструировались в программе Nrecon (1.7.4.2, Bruker-microCT, (Контит,

Бельгия)) со следующими основными параметрами реконструкции: ring reduction 20, beam hardening 30. Ориентация в пространстве (x, y, z) и выделение отдельных областей реконструированных материалов проводилась в программе DataViewer (1.5.6.2, Bruker-microCT, Контит, Бельгия). Визуализация и анализ данных проводилась в программе ST-analyser (1.18.4.0, Bruker-microCT, Контит, Бельгия). 3D визуализация полученных результатов, в зависимости от рентгенологической плотности, проводилась в программе STvox (3.3.0r1403, Bruker-microCT, Контит, Бельгия) (рис. 3).

Томографическое исследование проведено на 75 удалённых по ортодонтическим показаниям первых, вторых постоянных молярах верхней, нижней челюсти детей в возрастной категории 8-11 лет. После экстракции зубы погружались в 2% водный раствор Монохлорамина Б на 30 минут с дальнейшим тщательным удалением остатков периодонтальной связки, мягких тканей, зубных (минерализованных, не минерализованных) отложений. В дальнейшем, до проведения микро-КТ исследования, зубы хранились в полностью готовом к использованию универсальном фиксирующем растворе нейтрального забуференного 10% формалина («Первая Лабораторная Компания», Россия). Из общего числа удалённых зубов были сформированы две группы исследований: группа сравнения – 12 зубов без признаков кариозных поражений и деминерализации (рис. 4а); основная группа – 56 зубов с признаками кариозных поражений и деминерализации. Зубы, включённые в основную группу, в зависимости от степени деминерализации твёрдых тканей разделены на следующие подгруппы: 1-ая подгруппа – 17 зубов с кариесом в стадии белого пятна (рис. 4б); 2-ая подгруппа – 14 зубов с кариесом в стадии светло-коричневого пятна (рис. 4в); 3-ая подгруппа –

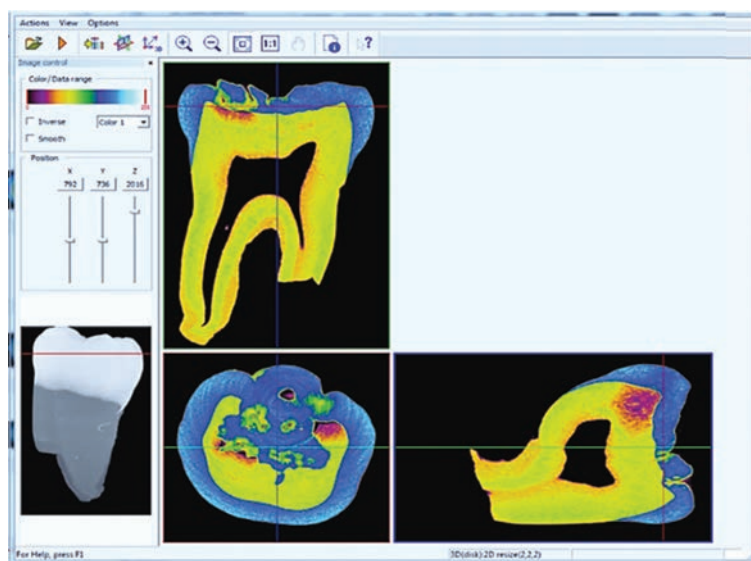


Рис. 3. Скриншот реконструированных 2D-проекций максимальной интенсивности на уровне верхней трети коронки зуба во фронтальной, аксиальной и сагиттальной плоскостях.

Fig. 3. The screenshot of the reconstructed 2D projections of the maximum intensity at the level of the upper third of the crown of the tooth in the frontal, axial and sagittal planes.

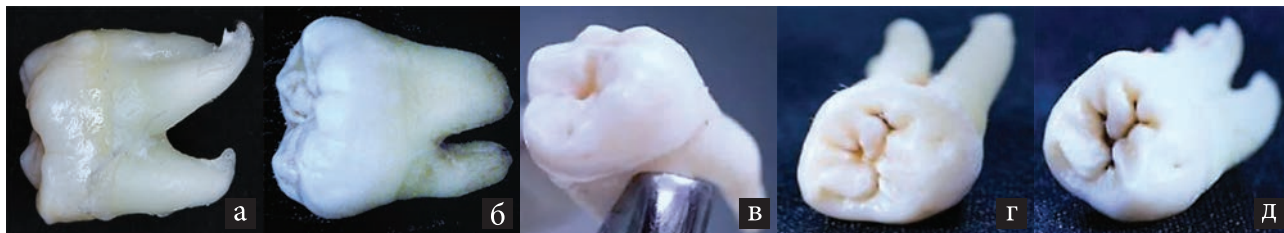


Рис. 4. Образцы зубов исследуемых групп: а – без признаков кариозных поражений; б – с кариесом в стадии белого пятна; в – с кариесом в стадии светло-коричневого пятна; г – с кариесом в стадии коричневого пятна; д – с кариесом в стадии чёрного пятна.

Fig. 4. The samples of teeth of the studied groups: а – without signs of carious lesions; б – with caries in the stage of a white spot; в – with caries in the stage of a light brown spot; г – with caries in the stage of a brown spot; д – with caries in the black spot stage.

13 зубов с кариесом в стадии коричневого пятна (рис. 4г); 4-ая подгруппа – 19 зубов с кариесом в стадии чёрного пятна (рис. 4д). Зубы, имеющие сочетанные (смешанные) типы кариозного поражения, в исследование не включались.

Перед определением рентгенологической (минеральной) плотности эмали зубов исследуемых групп в программе CTvox (3.3.0г1403, Bruker-microCT), сканированию подверглись два фантома известной плотности (0,25 и 0,75 г/см³) с последующим определением коэффициента затухания. Полученные данные были использованы для калибровки и количественного определения степени минерализации (деминерализации) эмали исследованных образцов методом микро-КТ.

Идентификацию зон (областей) для определения рентгенологической плотности деминерализованной эмали выявляли на реконструированных 2D и 3D изображениях путём измерения расстояния между исследуемой областью и точками возврата, а также по отношению к эмалево-дентинному соединению. Важно отметить, что зоны разрушения (деструкции) эмали и наружный слой эмали (50мкм) были исключены из исследований. Для каждой фор-

мы кариозного поражения, степень деминерализации оценивали с помощью окна плотности (диаметр 0,3×0,3 мм), которое направлялось в исследуемую область, а также смещалось на один шаг (step) в пределах каждого поражения в мезиальном, дистальном, щёчном и язычном направлениях. В связи с тем, что толщина эмалевого слоя существенно варьирует в верхней трети коронки зуба, изучение рентгенологической плотности очагов поражения (деминерализации) проводили во внешней (0,05-0,5 мм), средней (0,75-1,25 мм) и внутренней (1,5-2,0 мм) трети толщины эмали с вычислением средних цифровых значений, которые автоматически рассчитывались программой, и выводились в окно среза компьютерной томограммы (рис. 5).

Статистическая обработка результатов исследования осуществлялась с помощью пакета прикладных программ IBM SPSS Statistics V18.0 на уровне значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

Показатели минеральной плотности эмали зубов исследуемых групп с учётом цветовой кодировки кариозных поражений, полученные с ис-

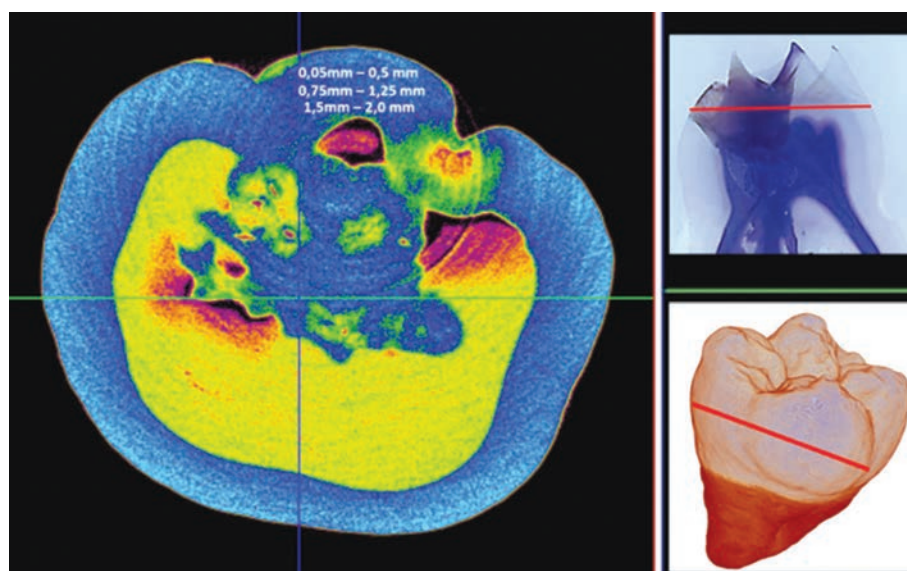


Рис. 5. Реконструированный сагиттальный срез деминерализованного моляра на уровне верхней трети коронки зуба (красной линией) с обозначенными зонами исследования. В боковом окне представлены реконструкции 3D изображений изучаемого зуба.

Fig. 5. The reconstructed sagittal slice of a demineralized molar at the level of the upper third of the crown of the tooth (red line) with marked study areas. The side window shows the reconstruction of the 3D images of the studied tooth.

Показатели минеральной плотности эмали зубов с учётом цветовой кодировки кариозных поражений, полученные с использованием микро-КТ, (г/см³), (M±m)

Indicators of the mineral density of tooth enamel, taking into account the color coding of carious lesions, obtained using micro-CT, (g/cm³), (M±m)

Форма кариозного поражения (цветовая кодировка)	Зоны исследования минеральной плотности эмали			
	Внешняя зона (треть) толщины эмали, 0,05-0,5 мм	Средняя зона (треть) толщины эмали, 0,75-1,25 мм	Внутренняя зона (треть) толщины эмали, 1,5-2,0 мм	Усреднённый показатель
Здоровая эмаль	2,58 ± 0,04	2,51 ± 0,06	2,35 ± 0,07	2,47 ± 0,12
Кариес в стадии белого пятна	2,50 ± 0,09*	2,46 ± 0,07*	2,31 ± 0,06*	2,41 ± 0,11*
Кариес в стадии светло-коричневого пятна	2,37 ± 0,08*	2,35 ± 0,06*	2,26 ± 0,03*	2,32 ± 0,07*
Кариес в стадии коричневого пятна	2,16 ± 0,16*	2,18 ± 0,13*	2,19 ± 0,11*	2,18 ± 0,12*
Кариес в стадии чёрного пятна	1,69 ± 0,13*	1,80 ± 0,14*	1,93 ± 0,21*	1,81 ± 0,12*

Примечание: * – статистически достоверно по отношению к показателям здоровой эмали, (p ≤ 0,05)

пользованием микро-КТ, представлены в таблице.

Результаты исследования минеральной плотности здоровой (интактной) зубной эмали свидетельствуют, что, наибольшая плотность отмечается во внешней зоне (2,58±0,04мм), наименьшая – во внутренней толщине эмали (2,35±0,07мм). Многие авторы доказательно утверждают, что поверхностная зона эмали (в отличие от глубоких слоёв) является наиболее резистентной к кариозному процессу из-за значительной степени минерализации, высокого физического сопротивления и микротвёрдости. Постепенное увеличение плотности по направлению к наружной поверхности эмали, по нашему мнению, обусловлено следующими причинами. Во-первых, от дентино-эмалевой границе к эмалевой поверхности двукратно увеличивается диаметр основных структурных единиц эмали (эмалевых призм). Во-вторых, сформированные S-образные (волнообразные) изгибы из пучков эмалевых призм аркадной или

гексагональной форм, присутствуют исключительно в подповерхностной и центральной зоне. В поверхностном слое эмаль зуба не имеет призматического строения и представлена безпризматической структурой. Данная морфоструктурная организация эмали препятствует возникновению радиальных трещин из-за неадекватного жевательного (окклюзионного) нагружения (рис. 6).

Оценка минеральной плотности ранних стадий кариозного поражения эмали зубов (белого, светло-коричневого пятен) указывает на аналогичную последовательность изменения плотности, схожую с интактными зубами. Максимальные параметры плотности зафиксированы во внешней зоне эмали (2,50±0,09мм и 2,37±0,08мм соответственно), минимальные – во внутренней (2,31±0,06мм и 2,26±0,03мм соответственно) (рис. 7 а,б). Последовательное снижение плотности по направлению к дентино-эмалевой границе связано с тем, что очаг деминерализации (кариозного поражения) имеет форму треугольника, основание которого обращено к наружной поверхности эмали, а вершина треугольника – к дентиноэмалевому соединению. Из факторов, устанавливающих наиболее высокие значения плотности в поверхностных отделах эмали, в сравнении с внутренними, при кариозных поражениях в стадии белого, светло-коричневого пятен, целесообразно выделить следующие. Во-первых, выявляемое специалистами при поляризационной микроскопии количество микропространств при белом, светло-коричневом кариозном пятне, увеличивается, в сравнении со здоровой эмалью (1%), достигая в наружном слое очага поражения 5%, в теле поражения – 15%. Во-вторых, полученные кариесологами данные электронной микроскопии свидетельствуют, что процесс деструкции начинается вдоль эмалевых призм с нарушением микроскопических связей, появлением щелей, изменением пространственной ориентации и формы кристаллов гидроксилатапов при их частичном разрушении. Формирующиеся

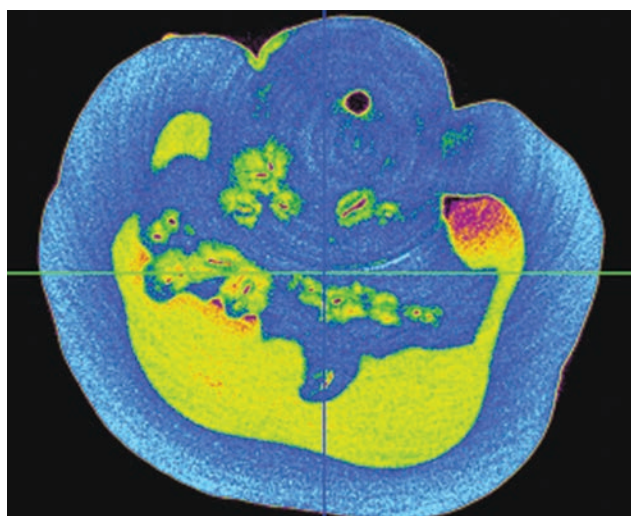


Рис. 6. Реконструированный сагиттальный срез интактного моляра на уровне верхней трети коронки зуба.

Fig. 6. The reconstructed sagittal slice of an intact molar at the level of the upper third of the crown.

в зоне деминерализации лакуны, заполняются органической субстанцией либо аморфными минеральными солями, которые поступают из слюны. Лакуны в очаге реминерализации заполняются гранулами фосфата кальция, причём их наличие установлено и в эмалевых призмах. Авторами не обнаружены процессы деструкции в органической строге в стадии белого и светло-коричневого пятна, однако выявлено нарушение связи белковой матрицы с минеральными компонентами в очаге деминерализации. В-третьих, результаты микрорентгенографических исследований убедительно доказывают, что степень минерализации эмалевых призм превышает аналогичные показатели оболочек эмалевых призм и межпризменного вещества, поэтому последовательность процессов деминерализации следующая: оболочки эмалевых призм, межпризменное вещество, эмалевые призмы. Снижение содержания кальций-фосфорных соединений, фторидов и других минеральных компонентов из межпризменной субстанции при кариозном поражении в стадии белого и светло-коричневого пятен, способствует расширению межпризменных микропространств и усилению процессов деминерализации в этой области. В-четвёртых, специалистами отмечено, что кариес на стадии белого и светло-коричневого пятен при площади поражения не более 1 мм², развивается с образованием двух зон – «прозрачной» и «тёмной». Подповерхностная эмалевая деминерализация при этом протекает без повреждения глубоких эмалевых слоёв и дентино-эмалевого соединения, а наружный эмалевый слой менее изменён над очагом поражения, чем глубокие слои. По нашему мнению, непрерывный процесс реминерализации со стороны ротовой жидкости и морфоструктурные особенности наружного слоя эмали способствуют продолжительному сохранению относительной целостности и оптической плотности внешнего эмалевого слоя. В связи с проницаемостью для красителей в стадии

белого, светло-коричневого пятен, начальные (ранние) процессы деминерализации, а также эффективность проведения реминерализующей терапии, можно диагностировать на клиническом приёме с помощью кариес-маркеров (красителей).

Анализ результатов изучения минеральной плотности кариозных поражений эмали в стадии коричневого и чёрного пятна свидетельствует об обратной последовательности изменения плотности, в сравнении с очагами белого и светло-коричневого цвета. Наибольшая плотность зафиксирована во внутренней зоне эмали ($2,19 \pm 0,11$ мм и $1,93 \pm 0,21$ мм соответственно), минимальная – во внешней зоне эмали ($2,16 \pm 0,16$ мм и $1,69 \pm 0,13$ мм соответственно) (рис. 8 а,б). Планомерное увеличение плотности по направлению к дентино-эмалевой границе, с нашей точки зрения, обусловлено тем, что очаг кариозного поражения (деминеализации) в сечении имеет форму трапеции, широкое основание которой обращено к наружной эмалевой поверхности, а узкое основание – к дентиноэмалевому соединению. Среди факторов, определяющих наиболее высокие показатели плотности по направлению к внутренней поверхности эмали, целесообразно выделить следующие. Во-первых, выявляемое при поляризационной микроскопии «тело» кариозного поражения, локализуется в подповерхностном участке, и представляет собой наибольшую по площади зону выраженной деминерализации. По данным авторов, в «теле» поражения отмечается снижение содержания до 20% минеральных веществ, увеличение объёма и расширение до 25% межпризменных микропространств, значительное повышение проницаемости при хорошо визуализированных линиях Ретциуса. Изменения в «теле» кариозного поражения затрагивают и кристаллическую структуру, проявляющуюся нарушением пространственной ориентации кристаллов в морфологическом строении

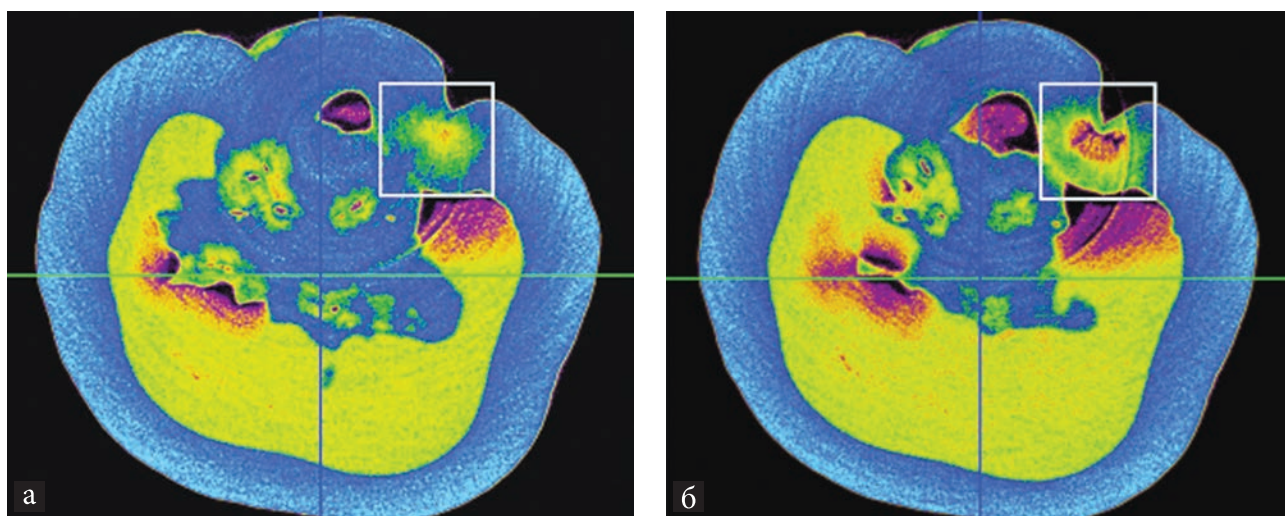


Рис. 7. Реконструированный сагиттальный срез моляра с кариозным поражением в стадии белого пятна (а) и светло-коричневого пятна (б) на уровне верхней трети коронки зуба.

Fig. 7. The reconstructed sagittal section of a molar with carious lesion in the stage of white spot (a) and light brown spot (b) at the level of the upper third of the tooth crown.

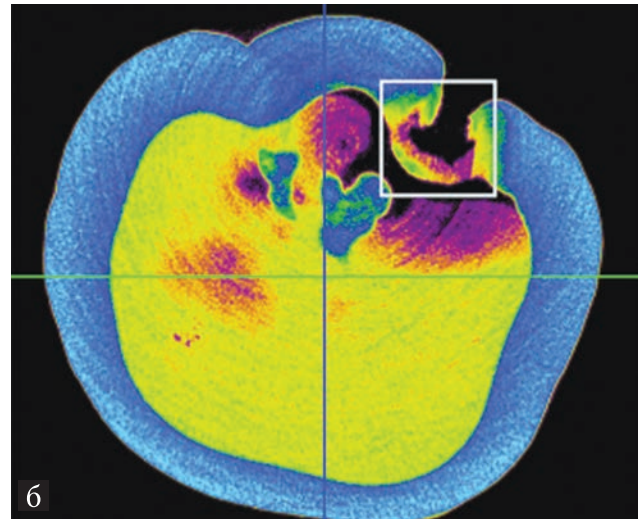
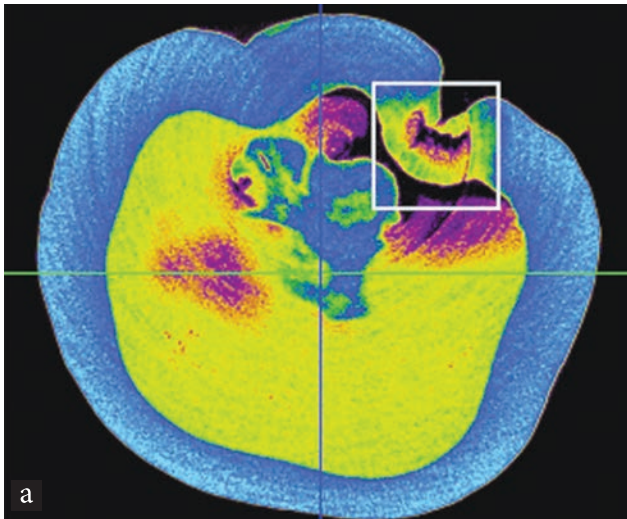


Рис. 8. Реконструированный сагиттальный срез моляра с кариозным поражением в стадии коричневого пятна (а) и чёрного пятна (б) на уровне верхней трети коронки зуба.

Fig. 8. The reconstructed sagittal section of a molar with a carious lesion in the stage of brown spot (a) and black spot (b) at the level of the upper third of the tooth crown.

гидроксиапатитов, изменением размерных и объёмных параметров, появлением атипичных для нормальной эмали кристаллов. Кроме того, диффундировавшие в эмаль органические вещества, из-за протекающих окислительно-восстановительных процессов, превращаются в меланиноподобные вещества, окрашивая при этом очаг деминерализации в коричневый (чёрный) цвет. Во-вторых, структура «тёмной» зоны, располагаемой на границе с «телом» кариозного поражения по направлению к дентиноэмалевому соединению, кариесологами характеризуется как зона с незначительным (2-4%) объёмом микропространств. В данной зоне отмечается преобладание процессов реминерализации над имевшими в «теле» поражения процессами деминерализации. В-третьих, структура «прозрачной» зоны, граничащая с «тёмной» зоной кариозного поражения в направлении к дентиноэмалевому соединению, специалистами описывается как гиперминерализованная зона с наименьшими повреждениями. Поры, образующиеся в результате выведения из кристаллической решетки апатита кислоторастворимого карбоната, в данной области локализируются вдоль эмалевых призм, а объём микропространств соответствует «поверхностной» зоне (0,5-1,0%). Степень минерализации в проекции линий Ретциуса соответствует показателям здоровой (интактной) эмали.

Таким образом, результаты проведённого исследования наглядно демонстрируют возможности метода микрокомпьютерной томографии с последующим анализом изображения и определением минеральной оптической плотности в оценке степени деминерализационных изменений зубной эмали на всех стадиях развития кариозного поражения. Установленные показатели минеральной оптической плотности здоровой эмали, а также эмали с различной интенсивностью кариозных поражений (стадия белого пятна, стадия светло-коричневого пятна,

стадия коричневого пятна, стадия чёрного пятна), полностью согласуются с опубликованными данными зарубежных специалистов, проводивших аналогичные исследования методом микро-КТ [24-29].

Заключение

Микрокомпьютерная томография, как высокотехнологичная, прогрессивная и прецизионная методика, позволяет получить представление о внутреннем строении зуба, как органа ротовой полости, существенно расширив потенциал инструментов количественного и качественного анализа, минимизировав погрешности, связанные с инструментальными способами измерений. В отличие от рентгенографических исследований, микро-КТ позволяет получать 2D-проекции максимальной интенсивности и 3D-реконструкции псевдоцветного объёмного рендеринга при минимальной подготовке образцов. Применение 3D псевдоцветного объёмного (трёхмерного) окрашивания в микро-КТ позволяет отчётливо, и с высокой степенью точности, визуализировать очаги деминерализации (кариозного поражения) зубной эмали от здоровых твёрдых тканей, имеющих схожие показатели оптической (рентгенологической) плотности.

Являясь неинвазивным методом, и имея возможность получения данных с высоким пространственным разрешением (прецизионность 150-200 нанометров), и в короткие сроки (время сканирования объекта – 122 минуты), информативными и диагностически значимыми являются следующие функции микро-КТ: определение оптической (рентгенологической) плотности; количественное измерение геометрических величин на реконструированных томограммах; оценка линейных размеров в любой исследуемой плоскости (аксиальной, фронтальной, сагиттальной); визуализация внутренней трёхмерной структуры объекта с возможностью проведения других видов исследований; реконструкция трёхмер-

ных тел с дальнейшим определением их объёмов.

По результатам микрокомпьютерной томографии зубов исследуемых групп определены усреднённые показатели минеральной оптической плотности эмали интактных (здоровых) зубов, а также зубов, имеющих различные виды кариозных поражений эмали. В порядке убывания параметров оптической плотности установлена следующая последовательность (градация): здоровая эмаль ($2,47 \pm 0,12$ г/см³) – кариес в стадии белого пятна ($2,41 \pm 0,11$ г/см³) – кариес в стадии светло-коричневого пятна ($2,32 \pm 0,07$ г/см³) – кариес в стадии коричневого пятна ($2,18 \pm 0,12$ г/см³) – кариес в стадии чёрного пятна ($1,81 \pm 0,12$ г/см³). Выявление корреляционных связей между цветом кариозного поражения (дефекта) и минеральной плотностью (степенью минерализации) зубной эмали расширяет понимание механизмов развития патогенеза кариеса, и способствует совершенствованию лечебно-профилактических мероприятий, направленных на повышение кариесрезистентности.

Применение метода микрокомпьютерной томографии, в комплексе с другими специальными методами (гистологическими, стереомикроскопическими, радиовизиографическими, оптическими и т.д.) позволяет утверждать, что фиссурный кариес представляет собой последовательный, постепенно прогрессирующий деструктивный процесс твёрдых тканей зуба (от очаговой деминерализации до формирования полости), характеризующий зависимость между интенсивностью (выраженностью) внутренних нарушений (изменений) и внешних разрушений (дефектов). Полученные данные указывают на целесообразность проведения активных вмешательств, направленных на предупреждение и стабилизацию процессов деминерализации твёрдых тканей зубов, путём внедрения индивидуальных профилактических программ детскому населению.

Микрокомпьютерная томография, как морфологически значимый метод получения чётких структурных изображений состояния твёрдых тканей зубов, может не только дополнять, но и заменять гистологический анализ при проведении стоматологических исследований с возможностью сохранения целостности изучаемого объекта.

Морфология, микроанатомия полости зуба и канално-корневых систем различных функционально-ориентированных групп зубов вариабельна и чрезвычайно сложна. Микрокомпьютерная томография, как высокоинформативный метод трёхмерной лучевой диагностики, позволяет детально изучить все особенности внутреннего строения полости зуба с возможностью получения высококачественных изображений внешних и внутренних анатомических особенностей.

Являясь неразрушающим методом исследования внутренней трёхмерной структуры образцов без их предварительной подготовки и обработки, использование метода микрокомпьютерной томо-

графии перспективно при оценке качественных, количественных показателей стоматологических материалов (керамика, композиты, сплавы металлов, облицовочные и базисные полимеры), используемых при изготовлении зубных имплантатов, ортопедических конструкций и эстетических реставраций.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Боровский Е.В., Леонтьев В.К. *Биология полости рта*. М.: Медицина. 1991; 304 с. [Borovskiy E.V., Leontyev V.K. *Biologiya polosti rta*. Moscow: The medicine, 1991; 304 p. (In Russ.)].
2. Goldberg M. Dental mineralization. *Int. J. Dev. Biol.*, 1995; 39: 93-110.
3. Быков И.М., Гильмиярова Ф.Н., Доменюк Д.А., Дмитриенко С.В., Иванюта С.О., Будаичев Г.М.-А. Оценка кариесогенной ситуации у детей с сахарным диабетом первого типа с учётом минерализующего потенциала ротовой жидкости и эмалевой резистентности. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2018; 25(4): 22-36. DOI: 10.25207 / 1608-6228-2018-25-4-22-36. [Bykov I.M., Gilmiyarova F.N., Domenyuk D.A., Dmitrienko S.V., Ivanyuta S.O., Budaychiv G. M.-A. Evaluation of cariogenic situation in children with type 1 diabetes mellitus given the mineralizing potential of saliva and enamel resistance. *Kubanskij nauchnyj medicinskij vestnik*. 2018; 25(4): 22-36. (In Russ., English abstract). DOI: 10.25207 / 1608-6228-2018-25-4-22-36.
4. Детская терапевтическая стоматология. Национальное руководство / под ред. В.К. Леонтьева, Л.П. Кисельниковой. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2010; 896 с. [Detskaya terapevticheskaya stomatologiya. Natsional'noye rukovodstvo. / edited by V.K. Leontyeva, L.P. Kiselnikova. Moscow: GEOTAR-Media, 2010; 896 p. (In Russ.)].
5. Доменюк Д.А., Давыдов Б.Н., Зеленский В.А., Карслиева А.Г. Оптимизация диагностики кариеса зубов у пациентов с зубочелюстными аномалиями на основе выявления прогностических факторов (Часть I). *Институт стоматологии*. 2014; 3(64): 37-39. [Domenyuk D.A., Davydov B.N., Zelensky V.A., Karslieva A.G. Optimizing the diagnosis of dental caries in patients with dental-anomalies based on the identification of prognostic factors (Part I). *Institute of Dentistry*. 2014; 3(64): 37-39. (In Russ., English abstract)].
6. Сайфуллина Х.М. Кариес зубов у подростков. М.: МЕДпресс. 2001; 95 с. [Sayfullina H.M. *Kariyes zubov u podrostkov*. Moscow: MEDpress, 2001; 95 p. (In Russ.)].
7. Доменюк Д.А., Давыдов Б.Н., Зеленский В.А., Карслиева А.Г. Системный анализ факторов риска возникновения и развития кариеса у детей с аномалиями зубочелюстной системы. Часть I. *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2014; Т.13; 3(50): 40-47. [Domenyuk D.A., Davydov B.N., Zelensky V.A., Karslieva A.G. System analysis of risk factors for developing caries in children with dentoalveolar anomalies. Part I. *Pediatric dentistry and prevention*. 2014; 13; 3(50): 40-47. (In Russ., English abstract)].
8. Виноградова Т.Ф. Атлас по стоматологическим заболеваниям у детей. Учебное пособие. М.: МЕДпресс-информ. 2010; 168 с. [Vinogradova T.F. *Atlas po stomatologicheskim zabolevaniy u detey*. Uchebnoye posobiye. Moscow: MEDpress-inform, 2010; 168 p. (In Russ.)].
9. Доменюк Д.А., Карслиева А.Г., Быков И.М., Кочконян А.С. Оценка кариесогенной ситуации у детей с зубочелюстными аномалиями по микробиологическим и биофизическим показателям ротовой жидкости. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2014; 5: 36-46. DOI: 10.25207/1608-6228-2014-5-36-46.

- [Domenyuk D.A., Karslieva A.G., Bykov I.M., Kochkonyan A.S. Evaluation of cariogenic situation in children with dentoalveolar anomalies based on microbiological and biophysical indicators in oral liquid. *Kubanskij nauchnyj medicinskij vestnik*. 2014; (5): 36-46. (In Russ., English abstract). DOI: 10.25207/1608-6228-2014-5-36-46.
10. Базиков И.А., Доменюк Д.А., Зеленский В.А. Полуколичественная оценка кариесогенной микрофлоры у детей с зубочелюстными аномалиями при различной интенсивности морфофункциональных нарушений. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2015; Т. 10; 3(39): 238-241. DOI: 10.14300/mnnc.2015.10055. [Bazikov I.A., Domenyuk D.A., Zelensky V.A. Semi-quantitative assessment of cariogenic microflora in children with dental-maxillary anomalies at different intensities of morphofunctional disorders. *Medical Bulletin of the North Caucasus*. 2015; Т. 10; 3(39): 238-241. (In Russ., English abstract). DOI: 10.14300/mnnc.2015.10055.
11. Луцкая И.К. *Рентгенологическая диагностика в стоматологии*. М.: Мед. лит. 2018; 128 с. [Lutskaya I.K. *Rentgenologicheskaya diagnostika v stomatologii*. Moscow: Medical literature, 2018; 128 p. (In Russ.)].
12. Доменюк Д.А., Давыдов Б.Н., Зеленский В.А., Карслиева А.Г. Оптимизация диагностики кариеса зубов у пациентов с зубочелюстными аномалиями на основе выявления прогностических факторов (Часть II). *Институт стоматологии*. 2014; 4 (65): 60-63. [Domenyuk D.A., Davydov B.N., Zelensky V.A., Karslieva A.G. Optimizing the diagnosis of dental caries in patients with dental-anomalies based on the identification of prognostic factors (Part II). *Institute of Dentistry*. 2014; 4 (65): 60-63. (In Russ., English abstract)].
13. Лучевая диагностика в стоматологии. Национальное руководство / гл. ред. тома А. Ю. Васильев. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2010; 288 с. [Luhevaya diagnostika v stomatologii. Natsional'noye rukovodstvo. / editor-in-chief of volume A.Yu. Vasilyev. Moscow: GEOTAR-Media, 2010; 288 p. (In Russ.)].
14. Аржанцев А.П. Рентгенологические исследования в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Атлас. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2016; 320 с. [Arzhantsev A.P. Rentgenologicheskiye issledovaniya v stomatologii i chelyustno-litsevoy khirurgii. Atlas. Moscow: GEOTAR-Media, 2016; 320 p. (In Russ.)].
15. Доменюк Д.А., Давыдов Б.Н., Зеленский В.А., Карслиева А.Г. Системный анализ факторов риска возникновения и развития кариеса у детей с аномалиями зубочелюстной системы. Часть II. *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2014; Т.13; 4 (51): 51-60. [Domenyuk D.A., Davydov B.N., Zelensky V.A., Karslieva A.G. System analysis of risk factors for developing caries in children with dentoalveolar anomalies. Part II. *Pediatric dentistry and prevention*. 2014; 13; 4 (51): 51-60. (In Russ., English abstract)].
16. Минченя О.В., Яцук А.И., Ковальчук Н.В. *Диагностика и особенности кариеса зубов у детей: Учебное пособие*. Минск: БГМУ, 2011. 40 с. [Minchenya O.V., Yatsuk A.I., Koval'chuk N.V. *Diagnostika i osobennosti kariyesa zubov u detey: Uchebnoye posobiye*. Minsk: BGMU, 2011. 40 p. (In Russ.)].
17. Fearne J., Anderson P., Davis G.R. 3D X-ray microscopic study of the extent of variations in enamel density in first permanent molars with idiopathic enamel hypomineralisation. *Br Dent J.*, 2004; 196: 634-638.
18. Schwass D.R., Swain M.V., Purton D.G., Leichter J.W. A system of calibrating microtomography for use in caries research. *J. Caries Res.*, 2009; 43: 314-321.
19. Пихур О.Л., Плоткина Ю.В., Франк-Каменецкая О.В., Павлов М.Р. Компьютерная микромография при исследовании твердых тканей зубов. *Альманах клинической медицины*. 2008; 17: 236-237. [Pikhur O.L., Plotkina Yu.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Pavlov M.R. Komp'yuternaya microtomografija pri issledovanii tverdykh tkaney zubov. *Almanac of Clinical Medicine*. 2008; 17: 236-237. (In Russ.)].
20. Batranin A.V., Chakhlov S.V., Grinev D.V., Kapranov B.I., Klimenov V.A. Design of the X-Ray micro-CT scanner TOLMI-150-10 and its perspective application in non-destructive evaluation. *Applied Mechanics and Materials* 2013; 379: 3-10, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.379.3>.
21. Dowker S.E.P., Elliott J.C., Davis G.R., Wilson R.M., Cloetens P. Three-dimensional study of human dental fissure enamel by synchrotron X-ray microtomography. *Eur. J. Oral. Sci.* 2003; 114: 353-359.
22. Курякина Н.В., Морозова С.И. Кариес и некариозные поражения твердых тканей зубов. Учебное пособие. С-Пб.: Меди. 2005; 110 с. [Kuryakina N.V., Morozova S.I. Kariyes i nekarioznyye porazheniya tverdykh tkaney zubov. Uchebnoye posobiye. St. Petersburg: Medi, 2005; 110 p. (In Russ.)].
23. Dowker S.E.P., Elliott J.C., Davis G.R., Wilson R.M., Cloetens P. Synchrotron X-ray microtomographic investigation of mineral concentrations at micrometre scale in sound and carious enamel. *J. Caries Res.* 2004; 38: 514-522.
24. Farah R.A., Swain M.V., Drummond B.K., Cook R., Atieh M. Mineral density of hypomineralised enamel. *J. Dent.*, 2010; 38: 50-58.
25. Huang T.T.Y., Jones A.S., He L.H., Ali Darendeliler M., Swain M. Characterisation of enamel white spot lesions using X-ray microtomography. *J. Dent.*, 2007; 35: 737-743.
26. Clementino-Luedemann T.N., Kunzelmann K.H. Mineral concentration of natural human teeth by a commercial micro-CT. *Dent. Mater. J.*, 2006; 25: 113-119.
27. Neves A.A., Coutinho E., Cardoso M.V., Jaecques S.V., Meerbeek B.V. Micro-CT based quantification evaluation of caries excavation. *J. Dent. Mater.*, 2010; 26: 579-588.
28. He B., Huang S., Zhang C. Mineral densities and elemental content in different layers of healthy human enamel with varying teeth age. *J. Arch Oral Biol.* 2011; 56: 997-1004.
29. Neboda C., Anthonappa R.P., King. N.M. Tooth mineral density of different types of hypomineralised molars: a micro-CT analysis. *European Academy of Paediatric Dentistry*, 2017; 1; 3-8. DOI:10.1007/s40368-017-0306-8

Поступила / Received 18.10.2018
Принята в печать / Accepted 22.11.2018

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest

Контактная информация: Доменюк Дмитрий Анатольевич; тел.: 8 (918) 870-12-05; e-mail: domenyukda@mail.ru; Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Мира, 310.

Corresponding author: Dmitry A. Domenyuk; tel.: 8 (918) 870-12-05; e-mail: domenyukda@mail.ru; 310, Mira str., Stavropol, Russia, 355017.