



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 83–94  
*Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 83–94  
[mmi.sgu.ru](http://mmi.sgu.ru) <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94>, EDN: [MMVQYW](https://www.edn.net/doi/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94)

Научная статья

УДК 517.98

## Влияние полимерного инфильтранта на плотность очагов кариеса эмали в стадии белого пятна

Е. В. Садырин

Донской государственный технический университет, Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1

**Садырин Евгений Валерьевич**, младший научный сотрудник лаборатории механики биосовместимых материалов, [e.sadyrin@sci.donstu.ru](mailto:e.sadyrin@sci.donstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5395-3310>, AuthorID: 770513

**Аннотация.** В современной стоматологической практике лечение ранних стадий кариеса возможно с использованием малоинвазивного вмешательства. В настоящей работе с использованием рентгеновской компьютерной микрофотографии (микро-КТ) проведено *ex vivo* неразрушающее исследование плотности очагов кариеса в стадии белого пятна до стоматологического вмешательства и после применения полимерного инфильтранта. Использование калибровочного фантома в ходе микрофотографирования образцов, а также техники сегментирования регионов интереса на очагах кариеса после реконструкции микрофотограмм зубов позволило исследовать количественное влияние инфильтранта на патологически измененную эмаль.

**Ключевые слова:** эмаль, кариес, механические свойства, плотность, полимерный инфильтрант, микрофотографирование

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-19-00444). Эксперименты выполнены в ресурсном центре коллективного пользования научно-образовательного центра «Материалы», Донской государственный технический университет. Автор благодарит профессора С. Ю. Максуюкова и Д. В. Ёгину (Ростовский государственный медицинский университет, г. Ростов-на-Дону) за предоставление образцов и проведение на них протокола инфильтрации.

**Для цитирования:** Садырин Е. В. Влияние полимерного инфильтранта на плотность очагов кариеса эмали в стадии белого пятна // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 83–94. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94>, EDN: [MMVQYW](https://www.edn.net/doi/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94)

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Influence of a polymeric infiltrant on the density of enamel white spot lesions

E. V. Sadyrin

Don State Technical University, 1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

**Evgenii V. Sadyrin**, [e.sadyrin@sci.donstu.ru](mailto:e.sadyrin@sci.donstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5395-3310>, AuthorID: 770513



**Abstract.** In modern dental practice, treatment of early stages of caries is possible using minimally invasive intervention. In this work, using X-ray computed microtomography (micro-CT), an *ex vivo* non-destructive study of the density of white spot lesions was carried out before and after the application of a polymer infiltrant. The use of a calibration phantom during microtomography of samples, as well as the technique of segmenting regions of interest on caries foci after reconstruction of microtomograms of teeth, made it possible to study the quantitative effect of the infiltrant on pathologically altered enamel.

**Keywords:** enamel, caries, mechanical properties, density, polymeric infiltrant, microtomography

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00444). The experiments were carried out in the resource center for collective use of the Research and Education Center “Materials”, Don State Technical University. The author thanks Professor S. Yu. Maksyukov and D. V. Yogina (Rostov State Medical University, Rostov-on-Don) for providing the samples and carrying out the infiltration protocol on them.

**For citation:** Sadyrin E. V. Influence of a polymeric infiltrant on the density of enamel white spot lesions. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 83–94 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94>, EDN: [MMVQYW](https://www.edn.ru/10.18500/1816-9791-2023-23-1-83-94)

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Первая клинически видимая стадия кариеса представляет собой область патологически измененной эмали под относительно неповрежденной поверхностью ткани (псевдоинтактная эмаль) [1]. Подповерхностная область характеризуется сниженными плотностью минерализации и механическими свойствами [2–4]. Подобное снижение свойств подповерхностной области объясняется частичным растворением основных структурных элементов эмали — кристаллов гидроксиапатита — кислотами, выработанными кариесогенными бактериями в полости рта в ходе процесса деминерализации [5] (*mutans streptococci* — ключевой микроорганизм в инициации кариеса, и *lactobacilli*, способствующие дальнейшему развитию кариеса [6, 7]).

В начале деминерализации в эмали возникают узкие воронкообразные дефекты с диаметром входа около 10 нм, глубиной 1000 нм. При прогрессировании деминерализации, приводящей к стиранию краев воронок, размер дефекта достигает длины средних волн видимого спектра (около 500 нм) и становится заметен визуально (стадия белого пятна, СБП) [8–10].

Наличие же псевдоинтактного слоя — следствие реминерализации части патологической эмали, представляющей собой процесс восстановления минеральных компонентов за счет слюны или реминерализующих растворов (содержащих ионы, предназначенные для замещения дефектов в кристалле гидроксиапатита [11]). Принцип действия методики инфильтрации заключается в удалении псевдоинтактного слоя эмали кислотой, высушивании подповерхностной области и пропитывании её высокотекучим полимерным материалом, после отверждения которого дефекты в деминерализованной эмали оказываются заполненными полимерной смолой, а очаг — «законсервированным», при этом эмалевые призмы остаются сохранными, а возможность удаления здоровой эмали под патологически измененной тканью исключается [12]. При этом исчезает необходимость использования анестезии. Однако эффективность этой процедуры исследована не в полной степени: в ряде клинических



случаев сообщается о её высокой эффективности [13–15], в то время как в других работах продемонстрирована низкая эффективность [16, 17].

В настоящей работе предложена модификация подхода к оценке эффективности стоматологического вмешательства [18, 19], с помощью которой проведено *ex vivo* исследование влияния полимерного инфильтранта на плотность минерализации области кариеса эмали в СБП с использованием рентгеновской компьютерной микротомографии (микро-КТ). Для количественной оценки изменения плотности эмали сканирование образца до и после стоматологического вмешательства проводилось с одинаковыми параметрами с калибровочным фантомом.

## 1. Материалы и методы

Три зуба человека (моляра) были удалены у пациентов по ортодонтическим показаниям в стоматологическом отделении клиники Ростовского государственного медицинского университета (РостГМУ, Ростов-на-Дону, Россия). Локальный независимый этический комитет РостГМУ одобрил исследование (выписка 14/21 от 23.09.2021), пациенты предоставили информированное согласие. Области кариеса в СБП на каждом из образцов были обнаружены стоматологами в соответствии с критериями Всемирной стоматологической федерации [20]. После извлечения каждый из образцов выдерживался в 1%-ном растворе NaClO (по массе) в течение 10 мин. Затем образцы были помещены в стерильные контейнеры со сбалансированным солевым раствором Хэнкса при 4<sup>0</sup>С с гранулами тимола (Унифарм, Славянск-на-Кубани, Россия), добавленными для предотвращения роста грибков и для дезинфекции. Отношение тимола к раствору Хэнкса составило 1:1000.

В качестве полимерного инфильтранта использован материал Icon (DMG Chemisch-Pharmazeutische, Берлин, Германия) в соответствии с протоколом, рекомендованным производителем: чистка зубов, нанесение концентрированной соляной кислоты на 2 мин, сушка поверхности эмали, нанесение инфильтранта на 3 мин, освещение полимеризационной лампой — 40 с, нанесение инфильтранта — 1 мин, полировка шлифовальным диском.

Сканирование проводилось на установке Xradia Versa 520 (Carl Zeiss Microscopy, Плэзэнтон, США) со следующими параметрами: напряжение рентгеновской трубки 110 кВ, мощность 9.5 В, размер вокселя 14.7 мкм, вращение образца на 360°, время экспозиции 1 с, фильтр на рентгеновской трубке HE6. В процессе сканирования получена 1601 проекция образца. Реконструкция набора проекций в набор виртуальных сечений проведена в программном обеспечении XRMReconstructor 12.0.8086.19558 со значениями смещения центра, определёнными в автоматическом режиме, использован фильтр размытия Гаусса (0.5) и сдвиг спектра пучка в более высокоэнергетическую область. Коррекции дрейфа осуществлялась с использованием опции дополнительных компенсирующих перемещений. Для количественного определения плотности была проведена калибровка зависимости значения серого от плотности изучаемого образца для конкретных условий проведения томографии [21]: над эмалью образцов был помещён калибровочный фантом с использованием стоматологического воска. Фантом представлял собой эталонный образец с известными значениями плотности его составляющих: полимер полиэтилентерефталат (1.35 г/см<sup>3</sup>), сплав на основе магния Ма2-1М (1.78 г/см<sup>3</sup>), сплав на основе алюминия САС1-400 (2.69 г/см<sup>3</sup>), природный минерал флюорит (3.09 г/см<sup>3</sup>).

Постпроцессинг реконструированных микротомограмм выполнен с использованием системы VGSTUDIO Max 3.5 (Volume Graphics GmbH, Хайдельберг, Германия).



Для реализации микро-КТ исследования использован следующий протокол: микро-КТ сканирование образца до стоматологического вмешательства; реконструкция набора проекций в трехмерную модель; построение линейной зависимости между значениями уровня серого цвета и плотностью минерализации; обработка области кариеса инфильтрантом; повторное микро-КТ сканирование; реконструкция набора проекций образца после обработки инфильтрантом в трехмерную модель; построение линейной зависимости между значениями уровня серого цвета и плотностью после обработки инфильтрантом; построение трехмерных карт плотности минерализации образца до и после обработки инфильтрантом; наложение полученных трехмерных карт друг на друга; сегментирование областей интереса кариеса эмали в СБП при помощи инструмента «Region growing», ограниченного эллиптическим цилиндром таким образом, чтобы покрывать основную деминерализованную область кариеса в СБП по ширине и длине, не затрагивая прилегающую и лежащую под ней здоровую эмаль (т.е. для двух областей интереса выполнялась булева операция «пересечение»); объемное выделение здоровой эмали с использованием эллиптического цилиндра аналогичного размера с последующим усреднением плотности по объему цилиндра.

## Результаты и их обсуждение

Ввиду способности инфильтранта модифицировать эмаль без создания существенных скачков свойств (в отличие от пломбировочных материалов) полученные наборы DICOM-файлов и реконструированные микрофотограммы не содержали существенных артефактов сканирования в областях, пораженных кариесом в СБП. Экспериментальные измерения плотности минерализации здоровой эмали и эмали в СБП для образцов хорошо соотносятся с имеющимися в литературе результатами [3, 22–26]. Расположение областей, обработанных инфильтрантом на каждом из образцов, приведены на рис. 1 с использованием цветового кодирования, где фиолетовый цвет соответствует области после стоматологического вмешательства.

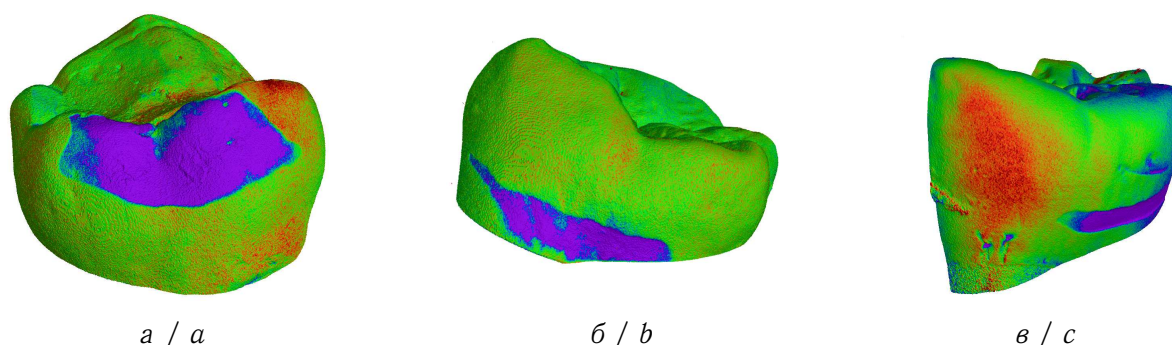


Рис. 1. Микрофотограммы областей, обработанных инфильтрантом (фиолетовый цвет) на образцах: а) 1; б) 2; в) 3 (цвет онлайн)

Fig. 1. Microtomograms of the areas treated with the infiltrant (purple color) on the samples: а) 1; б) 2; в) 3 (color online)

Микро-КТ исследование первого образца показало наличие существенного размера пломбы в эмали зуба, установленной пациенту в прошлом в окклюзионной области (рис. 2), в некотором отдалении от области кариеса в СБП. Для исследования плотности минерализации были выбраны объемы материала, ограниченные эллиптическими цилиндрами (их основания были ограничены квадратами со сторонами 0.58 мм, высотой 0.5 мм). Результаты измерений представлены в табл. 1.

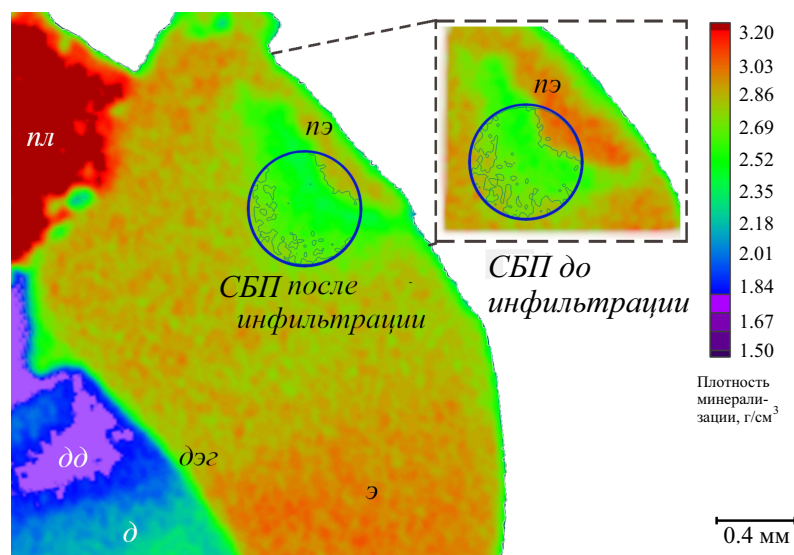


Рис. 2. Виртуальный срез на трехмерной карте плотности первого образца, обработанного инфильтрантом. На врезке справа – эмаль до применения стоматологического материала на той же области; э – эмаль, д – дентин, дд – деминерализованный дентин, пэ – псевдоинтактная эмаль, пл – пломба, дэг – дентиноэмалевая граница (цвет онлайн)

Fig. 2. Virtual slice on a three-dimensional density map of the first sample treated with an infiltrant. The inset on the right shows the enamel before the application of the dental preparation on the same area; э – enamel, д – dentine, дд – demineralized dentine, пэ – pseudo-intact enamel, пл – filling, дэг – dentine-enamel junction (color online)

Таблица 1 / Table 1

Значения плотности минерализации эмали до и после применения инфильтранта на участке кариеса в СБП: первый образец

Enamel mineral density values before and after the application of an infiltrant in the area of WSL caries: the first sample

Группа	Исследуемая область	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Стандартное отклонение, г/см <sup>3</sup>
Эмаль до вмешательства	Кариес в СБП	2.62	0.11
	Здоровая эмаль	2.97	0.12
Эмаль после вмешательства	Эмаль инфильтрированная	2.56	0.11
	Здоровая эмаль	2.91	0.10

Было установлено, что средняя плотность минерализации патологически измененной эмали ниже, чем у здоровой эмали, на 11.78%. После обработки области кариеса инфильтрантом средняя плотность модифицированной эмали снизилась на 12.03% по сравнению со здоровой эмалью. Толщина псевдоинтактного слоя эмали, удаленного с использованием кислоты, составила 0.17 мм. Тем не менее, из рис. 2 видно, что даже такой кислотной обработки оказалось недостаточно для растворения всего псевдоинтактного слоя.

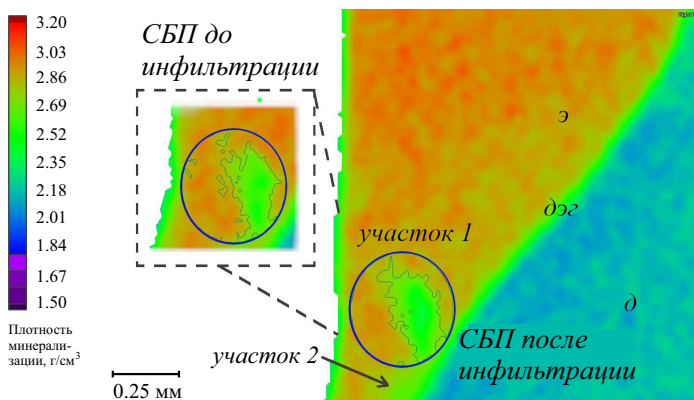


Рис. 3. Виртуальный срез двух участков деминерализации на трехмерной карте плотности второго образца, обработанного инфильтрантом. На врезке слева — эмаль до применения стоматологического материала на той же области; э — эмаль, д — дентин, дэз — дентиноэмалевая граница (цвет онлайн)

Fig. 3. Virtual slice of two demineralized sections on a three-dimensional density map of the second sample treated with an infiltrant. The inset on the left shows the enamel before the application of the dental preparation on the same area; э — enamel, д — dentine, дэз — dentine-enamel junction (color online)

После обработки области кариеса инфильтрантом средняя плотность модифицированной эмали снизилась на 5.57, 8.71, 6.60% по сравнению со здоровой эмалью соответственно для первого, второго и третьего участков. Кислота удалила  $0.08 \pm 0.02$  мм поверхностного псевдоинтактного слоя.

Микро-КТ исследование второго образца (рис. 3) показало три участка кариеса в пришеечной области, соединенные слабо деминерализованной эмалью.

Для исследования плотности минерализации соответственно первого, второго и третьего участков были выбраны объемы материала, ограниченные эллиптическими цилиндрами с основаниями, ограниченными прямоугольниками со сторонами: 0.29 и 0.39 мм, высотой 0.12 мм; 0.27 и 0.30 мм, высотой 0.5 мм; 0.25 и 0.31 мм, высотой 0.2 мм. Результаты измерений представлены в табл. 2. Было установлено, что средняя плотность минерализации патологически измененной эмали ниже, чем у здоровой эмали, на 3.13, 5.63, 6.23% соответственно для первого, второго и третьего участков. После обра-

Таблица 2 / Table 2

Значения плотности минерализации эмали до и после применения инфильтранта на участке кариеса в СБП: второй образец

Enamel mineral density values before and after the application of an infiltrant in the area of WSL caries: the second sample

Участок	Группа	Исследуемая область	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Стандартное отклонение, г/см <sup>3</sup>
1	Эмаль до вмешательства	Кариес в СБП	2.79	0.15
		Здоровая эмаль	2.88	0.10
	Эмаль после вмешательства	Эмаль инфильтрированная	2.71	0.10
		Здоровая эмаль	2.87	0.09
2	Эмаль до вмешательства	Кариес в СБП	2.68	0.12
		Здоровая эмаль	2.84	0.15
	Эмаль после вмешательства	Эмаль инфильтрированная	2.62	0.11
		Здоровая эмаль	2.87	0.10



Окончание таблицы 2 / Continuation of Table 2

Участок	Группа	Исследуемая область	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Стандартное отклонение, г/см <sup>3</sup>
3	Эмаль до вмешательства	Кариес в СБП	2.71	0.08
		Здоровая эмаль	2.89	0.10
	Эмаль после вмешательства	Эмаль инфильтрированная	2.69	0.08
		Здоровая эмаль	2.88	0.09

Микро-КТ исследование третьего образца (рис. 4) показало узкую вытянутую область кариеса в СБП, направленную под углом в пришеечную область эмали. Для исследования плотности минерализации на данном образце были выбраны объемы материала, ограниченные эллиптическими цилиндрами (их основания были ограничены прямоугольниками со сторонами 0.32 и 0.38 мм, высотой 0.16 мм). Результаты измерений представлены в табл. 3.

Расчеты показали, что средняя плотность минерализации патологической эмали ниже, чем у здоровой эмали, на 3.67%. После обработки области кариеса инфильтрантом средняя плотность модифицированной эмали снизилась на 4.20% по сравнению со здоровой эмалью. Кислота удалила 0.04 мм поверхностного псевдоинтактного слоя в окрестности области кариеса. Анализ результатов показывает, что кариес на исследованных образцах снизил плотность минерализации на 3.13–11.78%. При этом процедура инфильтрации не восстановила плотность ни в одном из случаев: было обнаружено снижение плотности на 4.20–12.03%.

Наименьшие значения плотности очага кариеса (как до применения инфильтранта, так и после) зафиксированы для первого образца, при этом плотность здоровой эмали на данном образце близка таковой на других образцах. Предположительно такое снижение связано с более развитой стадией кариеса (об этом также свидетельствует наибольший из трех образцов псевдоинтактный поверхностный слой, который не удалось вытравить полностью в ходе стоматологического вмешательства). Отметим, что в ряде случаев (образец 2, участок 1, рис. 3; образец 3, рис. 4) плотность модифицированной эмали оказалась близка к таковой для здоровой эмали. В случае образцов 1 и 3 зафиксировано снижение плотности здоровой эмали после проведения инфильтрации на 2.02

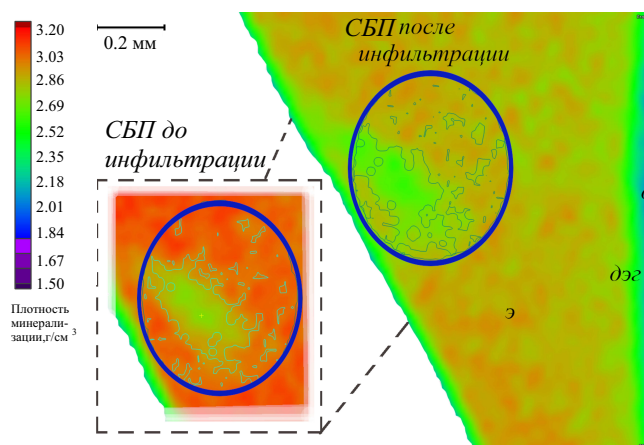


Рис. 4. Виртуальный срез на трехмерной карте плотности третьего образца, обработанного инфильтрантом. На врезке слева — эмаль до применения стоматологического материала на той же области; э — эмаль, д — дентин, дэг — дентиноэмалевая граница (цвет онлайн)

Fig. 4. Virtual slice on a three-dimensional density map of the third sample treated with an infiltrant. The inset on the left shows the enamel before the application of the dental preparation on the same area; э — enamel, д — dentine, дэг — dentine-enamel junction (color online)



Таблица 3 / Table 3

Значения плотности минерализации эмали до и после применения инфильтранта на участке кариеса в СБП: третий образец

Enamel mineral density values before and after the application of an infiltrant in the area of WSL caries: the third sample

Группа	Исследуемая область	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Стандартное отклонение, г/см <sup>3</sup>
Эмаль до вмешательства	Кариес в СБП	2.89	0.08
	Здоровая эмаль	3.00	0.10
Эмаль после вмешательства	Эмаль инфильтрированная	2.74	0.09
	Здоровая эмаль	2.86	0.10

и 4.67% соответственно предположительно ввиду недостаточной локализации области кариеса в ходе кислотного травления как части протокола инфильтрации. Данное наблюдение позволяет сделать рекомендацию для как можно более тщательной локализации области лечения зуба пациента практикующим врачом-стоматологом при проведении процедуры инфильтрации. В дальнейшем планируется исследовать дентин в окрестности очагов кариеса, обработанных инфильтрантом ввиду того, что ранее была показана способность данных материалов пересекать дентиноэмалевую границу и локально повышать плотность дентина [17].

## Заключение

В настоящей работе предложен модифицированный протокол для оценки влияния стоматологического лечения на плотность минерализации патологически изменённых тканей зуба с помощью микро-КТ, включающий в себя сегментирование тканей с использованием программных средств. Используя данный протокол, проведено сравнение *ex vivo* плотности минерализации патологически изменённых областей кариеса в СБП и инфильтрированных тканей зуба. Продемонстрирована высокая эффективность применения протокола. При изучении действия инфильтранта на ткани зуба получены следующие результаты:

- обнаружено, что процедура инфильтрации не восстановила плотность ни в одном из случаев, снижение плотности составило 4.20–12.03% по сравнению со здоровой эмалью;
- зафиксировано сильное отрицательное влияние кислоты на плотность минерализации тканей зуба, в том числе за пределами области очага кариеса;
- на одном из образцов не удалось избавиться от поверхностного псевдоинтактного слоя эмали в ходе применения протокола инфильтрации.

## Список литературы

1. Roora K. B., Pathak S., Poornima P., Neena I. E. White spot lesions: A literature review // Journal of Pediatric Dentistry. 2015. Vol. 3, iss. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.4103/2321-6646.151839>
2. Садырин Е. В., Ёгина Д. В., Васильев А. С., Айзикович С. М. Оценка влияния кариеса в стадии белого пятна на механические свойства эмали и дентина зуба человека // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 346–359. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-3-346-359>, EDN: ZTLZZG





3. Sadyrin E., Swain M., Mitrin B., Rzhepakovsky I., Nikolaev A., Irkha V., Yogina D., Lyanguzov N., Maksyukov S., Aizikovich S. Characterization of enamel and dentine about a white spot lesion: Mechanical properties, mineral density, microstructure and molecular composition // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, iss. 9. P. 1889. <https://doi.org/10.3390/nano10091889>
4. Huang T. T., Jones A. S., He L. H., Darendeliler M. A., Swain M. V. Characterisation of enamel white spot lesions using X-ray micro-tomography // *Journal of Dentistry*. 2007. Vol. 35, iss. 9. P. 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2007.06.001>
5. Marya A., Venugopal A., Karobari M. I., Rokaya D. White spot lesions: A serious but often ignored complication of orthodontic treatment // *The Open Dentistry Journal*. 2022. Vol. 16, iss. 1. P. 1–4. <https://doi.org/10.2174/18742106-v16-e2202230>
6. Chen L. R., Lai C. L., Chen J. P., Kao C. T. The effect of probiotics use on salivary cariogenic bacteria in orthodontic patients with various caries risk status // *Nutrients*. 2022. Vol. 14, iss. 15. P. 3196. <https://doi.org/10.3390/nu14153196>
7. Nyvad B., Crielaard W., Mira A., Takahashi N., Beighton D. Dental caries from a molecular microbiological perspective // *Caries Research*. 2013. Vol. 47, iss. 2. P. 89–102. <https://doi.org/10.1159/000345367>
8. Yu O. Y., Zhao I. S., Mei M. L., Lo E. C. M., Chu C. H. A review of the common models used in mechanistic studies on demineralization-remineralization for cariology research // *Dentistry Journal*. 2017. Vol. 5, iss. 20. P. 20. <https://doi.org/10.3390/dj5020020>
9. Guerra F., Mazur M., Nardi G. M., Corridore D., Pasqualotto D., Rinado F., Ottolenghi L. Dental hypomineralized enamel resin infiltration. Clinical indications and limits // *Senses and Sciences*. 2015. Vol. 2, iss. 4. P. 1–5. <https://doi.org/10.14616/sands-2015-4-135139>
10. Sadyrin E. V., Kislyakov E. A., Karotkiyan R. V., Yogina D. V., Drogan E. G., Swain M. V., Maksyukov S. Yu., Nikolaev A. L., Aizikovich S. M. Influence of citric acid concentration and etching time on enamel surface roughness of prepared human tooth: *In vitro* study // *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials* / eds.: H. Altenbach, M. Brünig, Z. Kowalewski. Cham : Springer, 2020. P. 135–150. (Advanced Structured Materials, vol. 121). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34851-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34851-9_8)
11. Hicks J., Garcia-Godoy F., Flaitz C. Biological factors in dental caries: Role of remineralization and fluoride in the dynamic process of demineralization and remineralization (part 3) // *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. 2004. Vol. 28, iss. 3. P. 203–214. <https://doi.org/10.17796/jcpd.28.3.w06104271746j34n>
12. Gomez J. Detection and diagnosis of the early caries lesion // *BMC Oral Health*. 2015. Vol. 15 (Suppl. 1). S3. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-15-S1-S3>
13. Başaran G., Veli I., Başaran E. G. Non-cavitated approach for the treatment of white spot lesions: A case report // *International Dental Research*. 2011. Vol. 1, iss. 2. P. 65–69. <https://doi.org/10.5577/intdentres.2011.vol1.no2.5>
14. Yuan H., Li J., Chen L., Cheng L., Cannon R. D., Mei L. Esthetic comparison of white-spot lesion treatment modalities using spectrometry and fluorescence // *The Angle Orthodontist*. 2014. Vol. 84, iss. 2. P. 343–349. <https://doi.org/10.2319/032113-232.1>
15. Eckstein A., Helms H. J., Knösel M. Camouflage effects following resin infiltration of postorthodontic white-spot lesions *in vivo*: One-year follow-up // *The Angle Orthodontist*. 2015. Vol. 85, iss. 3. P. 374–380. <https://doi.org/10.2319/050914-334.1>
16. Kim S., Kim E. Y., Jeong T. S., Kim J. W. The evaluation of resin infiltration for masking labial enamel white spot lesions // *International Journal of Paediatric Dentistry*. 2011. Vol. 21, iss. 4. P. 241–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-263X.2011.01126.x>
17. Sadyrin E. V., Yogina D. V., Swain M. V., Maksyukov S. Yu., Vasiliev A. S. Efficacy of dental materials in terms of apparent mineral density restoration: Composite resin, glass ionomer cement and infiltrant // *Composites Part C: Open Access*. 2021. Vol. 6. P. 100192. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100192>



18. Садырин Е. В., Ёгина Д. В., Волков Р. С., Айзикович Р. М. Оценка плотности и микрогеометрических характеристик пломб из стеклоиономерного цемента и композитного материала: биомеханическое *ex vivo* исследование // Российский журнал биомеханики. 2022. Т. 26, № 2. С. 67–73. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2022.2.06>
19. Borges A. B., Caneppele T. M. F., Masterson D., Maia L. C. Is resin infiltration an effective esthetic treatment for enamel development defects and white spot lesions? A systematic review // Journal of Dentistry. 2017. Vol. 56. P. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.10.010>
20. Fisher J., Glick M. A new model for caries classification and management: The FDI World Dental Federation caries matrix // Journal of the American Dental Association. 2012. Vol. 143, iss. 6. P. 546–551. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2012.0216>
21. Alyahya A., Alqareer A., Swain M. Microcomputed tomography calibration using polymers and minerals for enamel mineral content quantitation // Medical Principles and Practice. 2019. Vol. 28, iss. 3. P. 247–255. <https://doi.org/10.1159/000499186>
22. Hikita K., Van Meerbeek B., De Munck J., Ikeda T., Van Landuyt K., Maida T., Lambrechts P., Peumans M. Bonding effectiveness of adhesive luting agents to enamel and dentin // Dental Materials. 2007. Vol. 23, iss. 1. P. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.12.002>
23. Swain M. V., Xue J. State of the art of micro-CT applications in dental research // International Journal of Oral Science. 2009. Vol. 1, iss. 4. P. 177–188. <https://doi.org/10.4248/IJOS09031>
24. Sadyrin E. V. Correlating the mechanical properties of the mineral density of brown spot lesion in dentine using nanoindentation and X-ray micro-tomography // Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications / eds.: H. Altenbach, V. A. Eremeyev, A. S. Vasiliev. Cham : Springer, 2022. P. 389–398. (Advanced Structured Materials, vol. 155). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81705-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81705-3_21)
25. Huang T. T. Y., He L. H., Darendeliler M. A., Swain M. V. Correlation of mineral density and elastic modulus of natural enamel white spot lesions using X-ray microtomography and nanoindentation // Acta Biomaterialia. 2010. Vol. 6, iss. 12. P. 4553–4559. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.06.028>
26. Sadyrin E. V., Mitrin B. I., Yogina D. V., Swain M. V. Preliminary study of distribution of mechanical properties and mineral density by depth of liquid saturated carious dentine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 102. Art. 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012056>

## References

1. Roopa K. B., Pathak S., Poornima P., Neena, I. E. White spot lesions: A literature review. *Journal of Pediatric Dentistry*, 2015, vol. 3, iss. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.4103/2321-6646.151839>
2. Sadyrin E. V., Yogina D. V., Vasiliev A. S., Aizikov S. M. Evaluation of the influence of white spot lesion on the mechanical properties of human tooth enamel and dentine. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 346–359 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-3-346-359>, EDN: ZTLZZG
3. Sadyrin E., Swain M., Mitrin B., Rzhepakovsky I., Nikolaev A., Irkha V., Yogina D., Lyanguzov N., Maksyukov S., Aizikov S. Characterization of enamel and dentine about a white spot lesion: Mechanical properties, mineral density, microstructure and molecular composition. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 9, pp. 1889. <https://doi.org/10.3390/nano10091889>
4. Huang T. T., Jones A. S., He L. H., Darendeliler M. A., Swain M. V. Characterisation



- of enamel white spot lesions using X-ray micro-tomography. *Journal of Dentistry*, 2007, vol. 35, iss. 9, pp. 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2007.06.001>
5. Marya A., Venugopal A., Karobari M. I., Rokaya D. White spot lesions: A serious but often ignored complication of orthodontic treatment. *The Open Dentistry Journal*, 2022, vol. 16, iss. 1, pp. 1–4. <https://doi.org/10.2174/18742106-v16-e2202230>
  6. Chen L. R., Lai C. L., Chen J. P., Kao C. T. The effect of probiotics use on salivary cariogenic bacteria in orthodontic patients with various caries risk status. *Nutrients*, 2022, vol. 14, iss. 15, pp. 3196. <https://doi.org/10.3390/nu14153196>
  7. Nyvad B., Crielaard W., Mira A., Takahashi N., Beighton D. Dental caries from a molecular microbiological perspective. *Caries Research*, 2013, vol. 47, iss. 2, pp. 89–102. <https://doi.org/10.1159/000345367>
  8. Yu O. Y., Zhao I. S., Mei M. L., Lo E. C. M., Chu C. H. A review of the common models used in mechanistic studies on demineralization-remineralization for cariology research. *Dentistry Journal*, 2017, vol. 5, iss. 20, pp. 20. <https://doi.org/10.3390/dj5020020>
  9. Guerra F., Mazur M., Nardi G. M., Corridore D., Pasqualotto D., Rinado F., Ottolenghi L. Dental hypomineralized enamel resin infiltration. Clinical indications and limits. *Senses and Sciences*, 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 1–5. <https://doi.org/10.14616/sands-2015-4-135139>
  10. Sadyrin E. V., Kislyakov E. A., Karotkiyan R. V., Yogina D. V., Droган E. G., Swain M. V., Maksyukov S. Yu., Nikolaev A. L., Aizikovich S. M. Influence of citric acid concentration and etching time on enamel surface roughness of prepared human tooth: *In vitro* study. In: Altenbach H., Brünig M., Kowalewski Z. (eds.) *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials*. Advanced Structured Materials, vol. 121. Cham, Springer, 2020, pp. 135–150. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34851-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34851-9_8)
  11. Hicks J., Garcia-Godoy F., Flaitz C. Biological factors in dental caries: Role of remineralization and fluoride in the dynamic process of demineralization and remineralization (part 3). *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 2004, vol. 28, iss. 3, pp. 203–214. <https://doi.org/10.17796/jcpd.28.3.w06104271746j34n>
  12. Gomez J. Detection and diagnosis of the early caries lesion. *BMC Oral Health*, 2015, vol. 15 (Suppl. 1), S3. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-15-S1-S3>
  13. Başaran G., Veli I., Başaran E. G. Non-cavitated approach for the treatment of white spot lesions: A case report. *International Dental Research*, 2011, vol. 1, iss. 2, pp. 65–69. <https://doi.org/10.5577/intdentres.2011.vol1.no2.5>
  14. Yuan H., Li J., Chen L., Cheng L., Cannon R. D., Mei L. Esthetic comparison of white-spot lesion treatment modalities using spectrometry and fluorescence. *The Angle Orthodontist*, 2014, vol. 84, iss. 2, pp. 343–349. <https://doi.org/10.2319/032113-232.1>
  15. Eckstein A., Helms H. J., Knösel M. Camouflage effects following resin infiltration of postorthodontic white-spot lesions *in vivo*: One-year follow-up. *The Angle Orthodontist*, 2015, vol. 85, iss. 3, pp. 374–380. <https://doi.org/10.2319/050914-334.1>
  16. Kim S., Kim E. Y., Jeong T. S., Kim J. W. The evaluation of resin infiltration for masking labial enamel white spot lesions. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 2011, vol. 21, iss. 4, pp. 241–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-263X.2011.01126.x>
  17. Sadyrin E. V., Yogina D. V., Swain M. V., Maksyukov S. Yu., Vasiliev A. S. Efficacy of dental materials in terms of apparent mineral density restoration: Composite resin, glass ionomer cement and infiltrant. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 6, pp. 100192. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100192>
  18. Sadyrin E. V., Yogina D. V., Volkov S. S., Aizikovich S. M. Evaluation of density and microgeometrical characteristics of glass-ionomer cement and composite resin fillings: A biomechanical *ex vivo* study. *Russian Journal of Biomechanics*, 2022, vol. 26, iss. 2, pp. 67–73 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2022.2.06>



19. Borges A. B., Caneppele T. M. F., Masterson D., Maia L. C. Is resin infiltration an effective esthetic treatment for enamel development defects and white spot lesions? A systematic review. *Journal of Dentistry*, 2017, vol. 56, pp. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.10.010>
20. Fisher J., Glick M. A new model for caries classification and management: The FDI World Dental Federation caries matrix. *Journal of the American Dental Association*, 2012, vol. 143, iss. 6, pp. 546–551. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2012.0216>
21. Alyahya A., Alqareer A., Swain M. Microcomputed tomography calibration using polymers and minerals for enamel mineral content quantitation. *Medical Principles and Practice*, 2019, vol. 28, iss. 3, pp. 247–255. <https://doi.org/10.1159/000499186>
22. Hikita K., Van Meerbeek B., De Munck J., Ikeda T., Van Landuyt K., Maida T., Lambrechts P., Peumans M. Bonding effectiveness of adhesive luting agents to enamel and dentin. *Dental Materials*, 2007, vol. 23, iss. 1, pp. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.12.002>
23. Swain M. V., Xue J. State of the art of micro-CT applications in dental research. *International Journal of Oral Science*, 2009, vol. 1, iss. 4, pp. 177–188. <https://doi.org/10.4248/IJOS09031>
24. Sadyrin E. V. Correlating the mechanical properties of the mineral density of brown spot lesion in dentine using nanoindentation and X-ray micro-tomography. In: Altenbach H., Eremeyev V. A., Vasiliev A. S. (eds.) *Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications*. Advanced Structured Materials, vol. 155. Cham, Springer, 2022, pp. 389–398. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81705-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81705-3_21)
25. Huang T. T. Y., He L. H., Darendeliler M. A., Swain M. V. Correlation of mineral density and elastic modulus of natural enamel white spot lesions using X-ray microtomography and nanoindentation. *Acta Biomaterialia*, 2010, vol. 6, iss. 12, pp. 4553–4559. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.06.028>
26. Sadyrin E. V., Mitrin B. I., Yogina D. V., Swain M. V. Preliminary study of distribution of mechanical properties and mineral density by depth of liquid saturated carious dentine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 102, Art. 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012056>

Поступила в редакцию / Received 21.11.2022

Принята к публикации / Accepted 23.12.2022

Опубликована / Published 01.03.2023