



Рубникович С.П.¹, Осипов А.Н.², Бурак Ж.М.¹ ✉, Малицкий В.А.², Урбанович С.П.², Минченя В.Т.³

¹ Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

³ Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Беларусь

Диагностика состояния эмали зуба на основе анализа сигналов-откликов на низкочастотное контактное воздействие

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: все авторы внесли существенный вклад в написание статьи.

Подана: 12.11.2025

Принята: 12.12.2025

Контакты: wosstok@yandex.by

Резюме

Введение. В настоящее время существует множество методик скрининг-диагностики состояния эмали, каждая из которых имеет свои сильные и слабые стороны. Повышение точности определения состояния эмали зуба имеет важное значение для планирования и проведения индивидуальных мероприятий по поддержанию здоровья ротовой полости, что делает актуальным поиск новых диагностических методов. В данной статье приведены результаты исследований сигналов-откликов на низкочастотное контактное воздействие на эмаль зуба с применением частотно-временного преобразования для обработки данных.

Цель исследования. Провести анализ спектральных характеристик сигналов-откликов при низкочастотных контактных воздействиях на эмаль зубов.

Материалы и методы. На вестибулярной поверхности 9 третьих постоянных моляров с незаконченным формированием корней, удаленных по ортодонтическим показаниям, были выбраны по 2 точечные области, выделенные при помощи силиконового шаблона-позиционера. На выбранные точки проводились низкочастотное контактное воздействие на эмаль зубов и прием сигнала-отклика (шумов). После чего на исследуемые зоны в течение 60 секунд была помещена 37%-я ортофосфорная кислота. Затем зубы промывались под проточной водой и производилась повторная подача низкочастотного контактного воздействия и регистрация ответных шумов на это воздействие. Для обработки данных измерений использовался метод частотно-временного преобразования с построением результирующих спектрограмм.

Результаты. После деминерализации зубов существенно изменилась структура спектрограмм, что является следствием изменения сигнала-отклика на низкочастотное контактное воздействие. Увеличилась амплитуда ряда спектральных компонентов. Эта тенденция характерна для всех исследуемых образцов во всех режимах измерений.



Заключение. Установлена зависимость между состоянием эмали и параметрами частотно-временного преобразования сигнала-отклика: деминерализация эмали приводит к увеличению амплитуд компонентов спектрограммы.

Ключевые слова: эмаль, сигнал-отклик, частотно-временное преобразование, спектрограмма

Rubnikovich S.¹, Osipov A.², Burak Zh.¹ ✉, Malitsky V.², Urbanovich S.², Minchenya V.³

¹ Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

³ Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic", Minsk, Belarus

Tooth Enamel Diagnosis Based on the Analysis of Response Signals to Low-frequency Impact

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: all the authors have made a significant contribution to the writing the article.

Submitted: 12.11.2025

Accepted: 12.12.2025

Contacts: wosstok@yandex.by

Abstract

Introduction. There are numerous screening diagnostic methods available for assessing the condition of dental enamel currently, each with its own strengths and weaknesses. Improving the accuracy of enamel assessment is essential for planning and implementing individualized oral health maintenance measures, making the search for new diagnostic methods a pressing issue. This paper presents the findings of studies of response signals to low-frequency contact impact on tooth enamel. Time-frequency transformation method was used to process the data.

Purpose. To analyze the spectral characteristics of response signals during low-frequency impacts on tooth enamel.

Materials and methods. 2-point areas were selected and delimited using a silicone template-positioner on the vestibular surface of 9 third permanent molars with incompleting root formation, removed for orthodontic reasons. The selected points were exposed to low-frequency impact and a response signal was received. After that, 37% orthophosphoric acid was applied to the contour zones for 60 seconds. Then the teeth were rinsed under running water and the low-frequency impact was re-applied, the response noises to the effect were recorded. The data were processed using the frequency-time transformation method with the construction of the resulting spectrograms.

Results. After demineralization of teeth, the structure of spectrograms changed significantly due to the change in the signal-response to low-frequency impact. The amplitude of a number of spectral components increased. This trend is characteristic of all the studied samples in all measurement modes.

Conclusion. A correlation has been identified between the condition of the enamel and the temporal-frequency characteristics of the response signal, with enamel demineralization resulting in an augmentation of the amplitudes of spectrogram components.

Keywords: enamel, signal-response, time-frequency conversion, spectrogram

■ ВВЕДЕНИЕ

Стоматологическое здоровье – важная составляющая здоровья населения, а от качества стоматологической помощи зависит физическое, социальное и психологическое благополучие человека. Одним из важнейших компонентов стоматологической помощи, в соответствии с рекомендациями ВОЗ, является мониторинг стоматологического здоровья [1]. Качество и эффективность мониторинга зависит от многих факторов, но значительную роль играют современные методы скрининг-диагностики заболеваний и технические средства для их осуществления. Современный уровень информационно-коммуникационных технологий предоставляет обширные возможности для развития электронного здравоохранения, в том числе и в области стоматологии [2–4]. В частности, это дает новые возможности в скрининг-диагностике состояния эмали, определяющей кариесрезистентность, а следовательно, и в значительной степени стоматологическое здоровье человека. В настоящее время для определения свойств эмали предложены методы, в основе которых лежат лазерная флуоресценция, электропроводность, изменение оптических свойств после обработки раствором кислоты, время прохождения ультразвукового сигнала [5–7]. Следует отметить, что ни один из перечисленных методов в своем нынешнем варианте не является идеальным, что обуславливает целесообразность как совершенствования имеющихся методов диагностики, так и разработки новых скрининговых технологий. В связи с этим в данной статье приведены результаты исследований акустических сигналов-откликов на основе частотно-временного преобразования для диагностики состояния эмали зуба.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести анализ спектральных характеристик акустических сигналов-откликов при низкочастотных контактных воздействиях на эмаль зубов.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На исследуемый зуб осуществлялось низкочастотное контактное воздействие. После этого выполнялась регистрация ответных шумов на контактное воздействие и обработка результатов измерений.

Диагностика состояния эмали зубов осуществлялась с помощью экспериментального комплекса, схема которого представлена на рис. 1.

В состав комплекса входит устройство генерации периодического низкочастотного сигнала для контактного воздействия на эмаль, пьезоэлектрический датчик приема сигнала-отклика, усилитель сигнала, осциллограф, вычислительное устройство. Устройство низкочастотного сигнала предназначено для воздействия на зуб механическими, дозированными по усилию микроударами с заданной частотой (была применена частота следования одиночных импульсов f_i – 65 и 100 Гц). Пьезоэлектрический датчик воспринимает акустический сигнал, вызванный низкочастотным воздействием, и соответствующий затухающий акустический отклик на это воздействие. Сигнал с датчика усиливается и поступает на осциллограф для выполнения визуального контроля проводимого исследования. В качестве осциллографа использован цифровой осциллограф GPS71102 фирмы Gwinster. Далее регистрируемый сигнал записывался на вычислительное устройство (ноутбук) для дальнейшей обработки результатов.



Рис. 1. Структура экспериментального комплекса диагностики состояния зубов
Fig. 1. The structure of the experimental dental diagnostic complex

Для удобства были разработаны приспособление для крепления исследуемого зуба и устройство генерации низкочастотного контактного воздействия, представленные на рис. 2.

Исследование проведено на 9 третьих постоянных молярах с незаконченным формированием корней, удаленных по ортодонтическим показаниям. После удаления зубы механически очищались от мягких тканей, на 4 суток помещались в 3%-й раствор перекиси водорода и повторно механически очищались, промывались проточной водой и хранились в физиологическом растворе с добавлением кристаллика

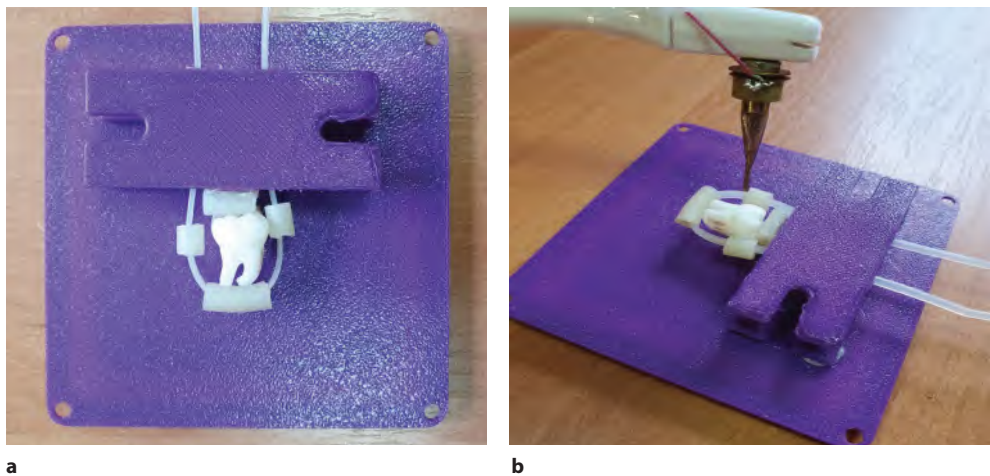


Рис. 2. Фотографии приспособления и устройства экспериментального комплекса:
а – приспособления для крепления исследуемого зуба; б – устройство генерации низкочастотного воздействия

Fig. 2. Photographs of devices of the experimental complex: а – devices for fixing the tooth under study; б – devices for generating periodic shock

тимола. Образцы были пронумерованы путем нанесения лака для ногтей на неисследуемые поверхности. Воздействие низкочастотного сигнала и прием сигнала-отклика производились в выбранных точках на вестибулярной поверхности удаленных зубов. Затем создавалась зона деминерализованной эмали. Для этого на область установки наконечника (точек) в течение 60 секунд была помещена 37%-я ортофосфорная кислота. Затем зубы промывались под проточной водой и производились повторная подача низкочастотного сигнала и считывание эхо-сигнала на контактные воздействия.

Для установки наконечника устройства, генерирующего низкочастотное контактное воздействие, в одну точку зуба при нескольких измерениях были изготовлены индивидуальные шаблоны-позиционеры, представляющие собой колпачки из прозрачного отлитого силикона, закрывающие не менее 2 поверхностей исследуемого зуба и имеющие толщину 1,5–3 мм. В области планируемого помещения наконечника устройства, генерирующего низкочастотное контактное воздействие, в шаблонах-позиционерах были сделаны отверстия диаметром 3 мм.

На основе предварительных исследований было установлено, что сигналы-отклики имеют шумоподобный вид и являются нестационарными. Метод частотно-временного преобразования (ЧВП) является эффективным для анализа данного типа сигналов [9]. Метод ЧВП, использованный для обработки данных в представленном исследовании, реализован на основе быстрого оконного преобразования Фурье (ОПФ или STFT – Short Time Fourier Transform) в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Аналоговый сигнал-отклик с пьезоэлектрического датчика через усилитель поступал в цифровой осциллограф, где он подвергался дискретизации по времени и квантованию по уровню.
2. Далее дискретный сигнал $x[i]$, $i = 0 \dots N-1$ разбивался на S перекрывающихся сегментов (временных окон), длительностью L отсчетов каждый. Длительность сегментов выбрана таким образом, чтобы статистические параметры сигналов могли рассматриваться как стационарные. В проводимых исследованиях длина анализируемой последовательности составляла 75 мсек при частоте дискретизации $f_d = 20\,226$ Гц. Соответственно, длительность отрезков составляла 4,9 мсек. Величина перекрытия сегментов при обработке задана таким образом, чтобы обеспечить непрерывность частотно-временного распределения (метод скользящего окна) и составляла 90%.
3. Для подавления явления растекания спектра каждый сегмент сглаживается специально подобранным фильтром путем умножения отрезка на функцию фильтра (оконную функцию). В расчетах применено временное косинусоидальное сглаживающее окно Хэннинга [10].
4. Для каждого отрезка исходного сигнала выполнялось быстрое преобразование Фурье исследуемого отрезка $x_t[i]$, $t=0 \dots S-1$, $i=0 \dots L-1$, умноженного на оконную функцию Хэннинга.
5. Далее для каждого отрезка исходного сигнала путем возведения в квадрат модуля быстрого оконного преобразования Фурье вычисляется оценка спектральной плотности. По результатам обработки всех временных окон строится результирующая спектрограмма, представляющая собой двумерную матрицу (массив данных), строки которой соответствуют номерам временных окон (пропорционально



временным отсчетам), столбцы – частотам f от 0 до $f_d/2$, а в ячейках рассчитана амплитуда электрограммы $A[f, t]$. При представлении спектрограммы в виде изображения изменение амплитуды в ячейках отображается изменением яркости изображения (больше амплитуда в ячейке массива – ярче точка изображения, соответствующая этой ячейке).

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены зондирующие низкочастотные сигналы и их отклики, регистрируемые в экспериментальном комплексе спектры откликов. Импульсы с максимальной амплитудой соответствуют периодическому зондирующему сигналу, остальные – импульсы сигнала-отклика. Зависимость амплитуды сигнала-отклика от времени носит затухающий и шумоподобный характер.

На рис. 4 и 5 представлены спектрограммы сигналов-откликов для одного из образцов (№ 5) на воздействие зондирующего сигнала с сильной и слабой интенсивностью. Спектрограммы рассчитаны для сигналов, зарегистрированных до и после деминерализации. Приведенные изображения получены при проведении исследований с локализацией в области слепой ямки и пришеечной области.

Ярко-красный цвет спектрограммы свидетельствует о максимальном значении амплитуды спектральных компонентов, тогда как темно-синий – о минимальном. Как следует из анализа изображений рис. 4, 5, после деминерализации зубов существенно изменилась структура спектрограмм, что является следствием изменения сигнала-отклика на низкочастотное воздействие. Увеличилась амплитуда ряда спектральных компонентов. Эта тенденция характерна для всех исследуемых образцов № 1–9 во всех режимах измерений.

Для оценки количественных изменений в изображении спектрограммы приведены данные расчетов изменения среднего значения амплитуд спектральных компонентов спектрограмм $A_{cp} = \frac{1}{t} \sum_{i=0}^t \frac{1}{f} \sum_{j=0}^f A[f, t]$, разницы средних значений амплитуд до минерализации $A_{cp \text{ до}}$ и после $A_{cp \text{ после}}$ (диагностический параметр),

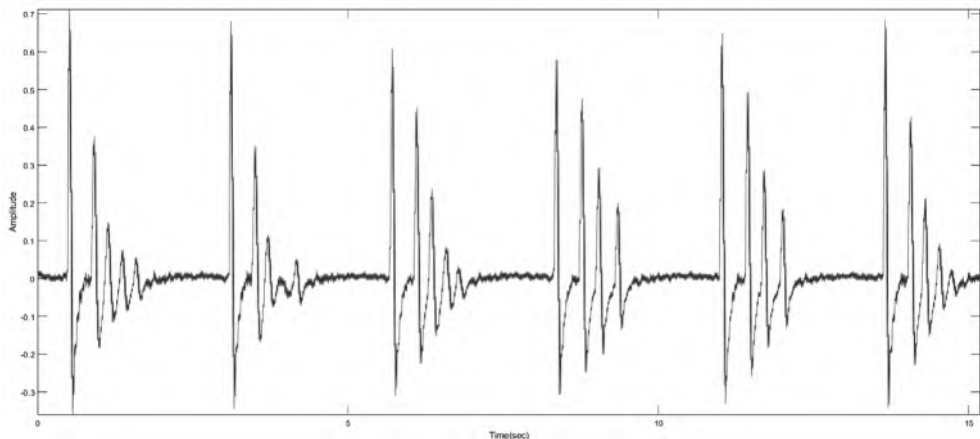


Рис. 3. Регистрируемый сигнал-отклик
Fig. 3. Recorded response signal

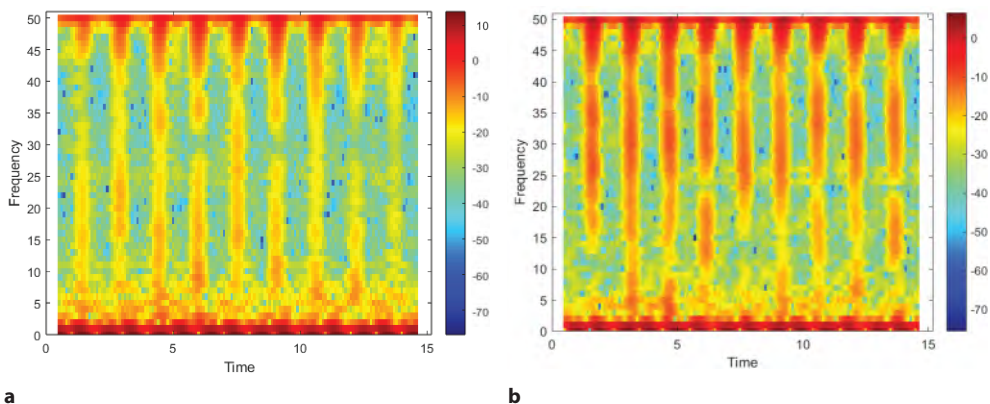


Рис. 4. Спектрограмма сигнала, снятого с области слепой ямки при частоте низкочастотных импульсов $f_i = 65$ Гц до (а) и после (б) деминерализации эмали
Fig. 4. Spectrogram of the response signal taken from the region of the blind fossa at a frequency of impact $f_i = 65$ Hz before (a) and after (b) enamel demineralization

а также изменения среднего значения амплитуд в процентах ΔA_{cp} . Результаты расчета для области слепой ямки представлены в таблице.

Средние значения амплитуд спектральных компонентов спектрограмм для исследуемых образцов зубов увеличились соответственно: от 0,5% до 10,4% (пришеечная область, слабая интенсивность); от 6,1% до 15,7% (пришеечная область, сильная интенсивность); от 1,0% до 18,8% (слепая ямка, слабая интенсивность); от 2,3% до 26,7% (слепая ямка, слабая интенсивность). Полученные данные свидетельствуют об изменениях сигнала-отклика при изменении состояния эмали зубов. Кроме того, степень изменения среднего значения амплитуд спектрограммы (чувствительность измерений диагностического параметра) зависит и от режима генерирования низкочастотного сигнала (сильная или слабая интенсивность), что определяет необходимость проведения дальнейших исследований.

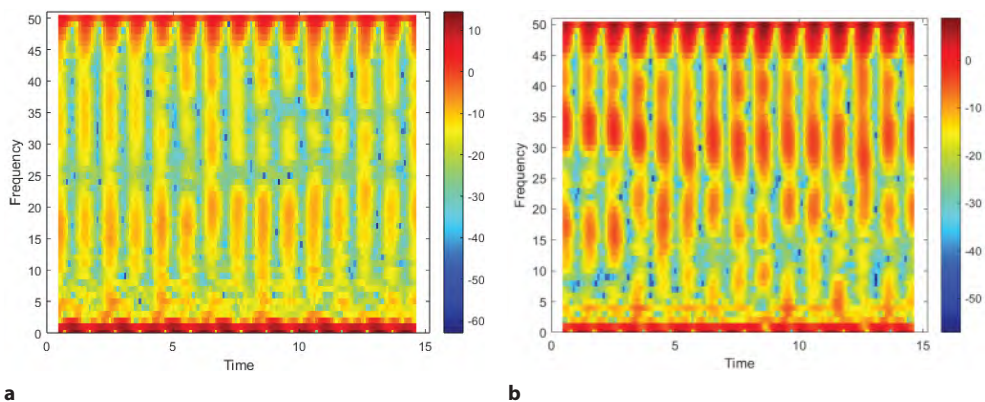


Рис. 5. Спектрограмма сигнала, снятого с области слепой ямки при частоте низкочастотных импульсов $f_i = 100$ Гц до (а) и после (б) деминерализации эмали
Fig. 5. Spectrogram of the response signal taken from the region of the blind fossa at a frequency of impact $f_i = 100$ Hz before (a) and after (b) enamel demineralization

Изменения среднего значения амплитуд спектральных компонентов спектрограмм
Changes in the average values of the spectral component amplitudes in the spectrograms

Слабая интенсивность									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A_{\text{ср.до}}$	23,00	26,52	25,89	26,19	24,02	24,18	25,82	21,46	21,74
$A_{\text{ср.после}}$	24,94	27,36	26,17	26,53	28,54	24,42	28,22	22,95	24,74
$\Delta A_{\text{ср}}$	1,94	0,84	0,28	0,34	4,52	0,24	2,40	1,49	3,00
$\% \Delta A_{\text{ср}}$	8,4%	3,2%	1,1%	1,3%	18,8%	1,0%	9,3%	6,9%	13,8%
Сильная интенсивность									
$A_{\text{ср.до}}$	16,41	14,89	16,20	16,54	13,87	15,87	17,10	13,78	17,17
$A_{\text{ср.после}}$	16,79	18,33	17,61	17,21	17,16	17,93	18,32	17,46	18,42
$\Delta A_{\text{ср}}$	0,38	3,44	1,41	0,67	3,29	2,06	1,22	3,68	1,25
$\% \Delta A_{\text{ср}}$	2,3%	23,1%	8,7%	4,0%	23,7%	13,0%	7,1%	26,7%	7,3%

■ **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе исследовано применение низкочастотных контактных воздействий для выявления изменений состояния эмали зуба. Для анализа сигнала-отклика на контактное воздействие на зуб использован метод частотно-временного преобразования. Установлена зависимость между состоянием эмали и параметрами ЧВП сигнала-отклика: деминерализация эмали приводит к увеличению амплитуд компонентов спектрограммы. В проведенных исследованиях увеличение среднего значения амплитуды спектральных компонентов после обработки зубов составило от 0,5% до 26,7%. Это увеличение в значительной степени определяется параметрами зондирующего сигнала. Результаты работы могут быть использованы при разработке методик и приборов диагностики изменений состояния эмали зубов на основе анализа сигналов-откликов на низкочастотное контактное воздействие на зуб.

■ **ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES**

1. Leous P.A. Dentistry in Belarus: yesterday, today, tomorrow. *Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference with International Participation "Current Issues in the Prevention, Diagnosis, and Treatment of Dental Diseases"*. Minsk, Belarus. 2018 May 18:15–19. (in Russian)
2. Bondarik V.M. et al. Methods of designing devices and systems for medical electronics. *Reports of BSUIR*. 2024;22(2):105–115. doi: 10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115 (in Russian)
3. Islam M.M., Rahaman A., Islam M.R. Development of smart healthcare monitoring system in IoT environment. *SN Comput Sci*. 2020;1(185):1–11. doi: 10.1007/s42979-020-00195-y
4. Pradhan B., Bhattacharyya S., Pal K. IoT-based applications in healthcare devices. *J Healthc Eng*. 2021;2021:1–18. doi: 10.1155/2021/6632599
5. Kalashnikova N., Avraamova O., Kulazhenko T., Goryacheva V., Khokhlova S. Modern instrumental methods for early diagnosis of dental caries. *Stomatologiya (Dentistry)*. 2022;101(1):89–95. (in Russian)
6. Sedoykin A., Fokina A., Ermoliev S., Kiselnikova L., Yanushevich O., Tekucheva S. *Ultrasonic velosymmetry method for assessing the condition of hard dental tissues [Patent]*. RU Patent 2790947C1. 2023 Feb 28. (in Russian)
7. Kallis J.M. *Method and apparatus for tooth crack detection by means of acoustic emission [Patent]*. US Patent 8641415B2. 2011.
8. Osipov A.N. et al. Algorithm for measuring heart rate in systems for monitoring human functional state. *Digital Transformation*. 2023;29(4). doi: 10.35596/1729-7648-2023-29-4-XX-XX (in Russian)
9. Rangayyan R.M. *Analysis of Biomedical Signals: A Practical Approach*. Moscow: FIZMATLIT; 2007;440 p. (in Russian)