

Оценка изменений деминерализации в тканях моляров *in vitro* на основании результатов частотных характеристик импеданса

В.Д. Гончаров², М.А. Гореликова², К.В. Шадрина¹, Л.Ю. Орехова¹,
В.Д. Березкин¹, Е.С. Немовская¹, А.А. Петров^{1*}

¹Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Ранняя диагностика кариеса является важным элементом профилактики заболеваний пародонта и поддержания общего стоматологического здоровья. Одним из возможных методов определения патологических процессов в тканях зуба является исследование его частотных характеристик. Цель. Разработка методики, позволяющей использовать результаты исследований частотных характеристик импеданса эмали для количественной оценки изменений, произошедших в тканях моляра при разной глубине поражения кариозного процесса. **Материалы и методы.** Исследования проводились *in vitro* на 15 интактных молярах. Для измерения комплексного сопротивления использовался измеритель импеданса E7-20, позволяющий проводить измерения в частотном диапазоне до 1 МГц. Измерения проводились до и после искусственной деминерализации в одной и той же области зуба. **Результаты.** Установлено влияние деминерализации эмали на частотные характеристики импеданса моляров *in vitro*. Предложена эквивалентная электрическая схема замещения, позволяющая описать электромагнитные процессы в отдельных тканях зуба. Экспериментальные результаты и численные эксперименты, выполненные с использованием эквивалентной электрической схемы замещения, позволили определить значения параметров отдельных элементов этой схемы до и после деминерализации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что экспериментально полученные изменения в частотных характеристиках связаны с изменением активного и емкостного сопротивления только эмали зуба и не затрагивают параметры дентина. Характер изменений, возникающих при деминерализации эмали, можно объяснить увеличением ее пористости. **Заключение.** С помощью измеренных частотных характеристик импеданса и значений параметров эквивалентных электрических схем замещения зуба можно определять, в каких тканях зуба произошли изменения, что позволяет использовать спектроскопию импеданса для определения начальных процессов деминерализации эмали.

Ключевые слова: кариес, импеданс, частотные характеристики, схемы замещения, деминерализация

Для цитирования: Гончаров ВД, Гореликова МА, Шадрина КВ, Орехова ЛЮ, Березкин ВД, Немовская ЕС, Петров АА. Оценка изменений деминерализации в тканях моляров *in vitro* на основании результатов частотных характеристик импеданса. *Пародонтология*. 2025;30(3):254-265. <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2025-1091>

***Автор, ответственный за связь с редакцией:** Петров Александр Александрович, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, 197000, ул. Льва Толстого, д. 6-8, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. Для переписки: raa_stom@mail.ru

Конфликт интересов: Орехова Л. Ю. является главным редактором журнала «Пародонтология», но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по конкурсу «УМНИК – Проектная команда. Электроника» (очередь II).

Благодарности: Индивидуальные благодарности для декларирования отсутствуют.

Evaluation of demineralization changes in molar tissues in vitro using electrical impedance spectroscopy

V.D. Goncharov², M.A. Gorelikova², K.V. Shadrina¹, L.Yu. Orekhova¹,
V.D. Berezkin¹, E.S. Nemovskaya¹, A.A. Petrov^{1*}

¹First Saint Petersburg State Medical University named after academician I. P. Pavlov,
Saint Petersburg, Russian Federation

²Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. Early diagnosis of dental caries plays a key role in preventing periodontal diseases and supporting overall oral health. One promising approach for detecting pathological changes in dental tissues is electrical impedance spectroscopy (EIS), based on analysis of their frequency-dependent impedance characteristics. **Objective.** To develop a methodology that applies impedance spectroscopy for the quantitative assessment of tissue changes in molars at varying depths of carious lesions. **Materials and methods.** The study was conducted in vitro on 15 intact molars. Complex impedance was measured using an E7-20 impedance analyzer operating in the frequency range up to 1 MHz. Measurements were performed in the same region of each tooth before and after artificial demineralization. **Results.** Enamel demineralization was found to affect the frequency-dependent impedance characteristics of molars in vitro. An equivalent electrical circuit was proposed to model the electrical processes in individual dental tissues. Experimental data, together with numerical simulations based on the equivalent circuit, enabled determination of circuit parameters before and after demineralization. The results indicate that the observed changes in impedance spectra are attributable to alterations in the resistive and capacitive properties of enamel, while the parameters of dentin remained unaffected. These changes can be explained by increased enamel porosity resulting from demineralization. **Conclusion.** Analysis of frequency-dependent impedance characteristics and equivalent circuit parameters provides a means of identifying which dental tissues have undergone changes. These findings support the potential of impedance spectroscopy as a diagnostic tool for detecting early enamel demineralization. **Key words:** dental caries, impedance spectroscopy, frequency-dependent characteristics, equivalent electrical circuits, enamel demineralization

For citation: Goncharov V.D., Gorelikova M.A., Shadrina K.V., Orekhova L.Yu., Berezkin V.D., Nemovskaya E.S., Petrov A.A. Evaluation of demineralization changes in molar tissues in vitro using electrical impedance spectroscopy. *Parodontologiya*. 2025;30(3):254-265. (In Russ.). <https://doi.org/10.33925/1683-3759-2025-1091>

***Corresponding author:** Alexander A. Petrov, Department of Restorative Dentistry and Periodontology, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6 Lev Tolstoy Str., Saint Petersburg, Russian Federation, 197022. For correspondence: paa_stom@mail.ru

Conflict of interests: L.Y. Orekhova, the editor-in-chief of the journal *Parodontologiya*, was not involved in the decision to publish this article. The article underwent the standard peer-review process of the journal. The authors have declared no other conflicts of interest.

Funding: This work was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE) under the UMNIK – Project Team. Electronics program (second round).

Acknowledgments: There are no individual acknowledgments to declare.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения, здоровье полости рта человека имеет жизненно важное значение для сохранения его здоровья и благополучия и является основным фактором, определяющим его общее состояние здоровья.

Клинические исследования показали положительную корреляцию между кариесом зубов и пародонтизом [1]. Кариес, локализованный в пришеечной области, способствует накоплению бактериального налета и образованию поддесневых зубных отложений, что создает условия для воспалительных про-

цессов в тканях пародонта. Данные условия могут привести к развитию гингивита, а в дальнейшем – к пародонтиту, сопровождающемуся деструкцией костной ткани и потерей зуба.

Своевременное выявление и лечение кариозного процесса позволяет минимизировать риск бактериальной инвазии в зубодесневую борозду, снижая вероятность воспаления и сохраняя целостность опорно-удерживающего аппарата зуба.

Кариозный процесс начинается с деминерализации твердых тканей зуба под воздействием органических кислот, продуцируемых микроорганизмами полости рта. Образующиеся в результате этого поры

в эмали характеризуются изменением показателей преломления света, что визуально проявляется в виде белых пятен (white spot lesions, WSL) [2]. Неоднородность поверхности эмали в области белого пятна и вблизи него, по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ) сканирования, в несколько раз превышает неоднородность здоровой эмали, что свидетельствует о ее деминерализации [3]. Диагностика вызывает затруднение особенно при наличии белого пятна малых размеров, так как поверхностный слой эмали сохраняется клинически интактным [4]

В настоящее время применяются различные методы диагностики кариеса, которые условно разделяются на основные (визуальный осмотр, зондирование) и дополнительные (витальное окрашивание, термодиагностика, рентгенография, электроодонтодиагностика (ЭОД), лазерно-флуоресцентный метод, цифровая фиброоптическая трансиллюминация, количественная световая флуоресценция) [5]. Детальная классификация методов диагностики кариеса представлена в консенсусном документе ORCA-EFCD [6].

Наиболее распространенные дополнительные методы диагностики, такие как рентгенография, позволяют выявить кариозный процесс на поздних стадиях, когда единственным вариантом лечения становится препарирование тканей с последующим пломбированием [7]. Раннее выявление стадии деминерализации без деструктивных изменений эмали позволяет избежать инвазивного вмешательства [8] и открывает возможности для применения реминерализующей терапии и минимально инвазивных методов лечения [9-11], что способствует сохранению большего объема интактных тканей зуба и улучшению качества жизни пациента. При этом ранняя диагностика деминерализации эмали является важным элементом профилактики заболеваний пародонта и поддержания общего стоматологического здоровья.

Среди современных методов аппаратной диагностики деминерализации эмали на ранних стадиях выделяются лазерная флуоресценция [12] и цифровая волоконно-оптическая трансиллюминация [13]. Лазерная флуоресценция основана на явлении флуоресценции твердых тканей зуба при воздействии лазерного излучения определенной длины волны. Цифровая трансиллюминация использует прохождение пучка холодного света через ткани зуба. Даже незначительные изменения в структуре тканей зуба, такие как деминерализация, сопровождаются изменением их оптических свойств, что позволяет выявлять патологические отклонения путем анализа отклика на световое воздействие. Оба метода являются неинвазивными и не вызывают дискомфорта у пациента [13]. Однако их применение требует высококачественного оборудования, что ограничивает доступность данных технологий для большинства клиник из-за высокой стоимости

Электроодонтодиагностика (ЭОД) – диагностический метод определения состояния иннервационного

аппарата зуба с помощью электрического тока. ЭОД рекомендована Минздравом России для применения в медицинских учреждениях стоматологического профиля и в основном применяется для диагностики пульпита [14]. ЭОД имеет ряд ограничений: невозможность диагностики начального кариеса, определения глубины и топографии кариозного процесса, а также сложности в интерпретации результатов [15]. Кроме того, метод связан с субъективными болевыми ощущениями пациента, что снижает его диагностическую ценность. На результаты ЭОД также влияют пороговая чувствительность нервной системы пациента, форма используемого тока [14], наличие коронок, штифтов или амальгам в полости рта.

Альтернативным подходом к диагностике деминерализации эмали являются электрометрические методы, в основу которых положена зависимость между электропроводностью твердых тканей зуба и степенью их минерализации [16]. Электрометрический метод диагностики (ЭМД) основан на повышении электрической проводимости деминерализованных тканей зуба при сохранении интактного поверхностного слоя. Ранние стадии деминерализации эмали сопровождаются увеличением ее пористости вследствие вымывания минеральных компонентов. Образующиеся поры заполняются слюной и дентинной жидкостью, что изменяет электропроводность [17].

Современным подходом к диагностике деминерализации эмали является метод спектроскопии переменного импеданса (ACIST). Этот метод не требует инвазивных процедур и основан на том, что неповрежденная эмаль благодаря своему химическому составу функционирует как эффективный изолятор в электрической цепи. Когда твердая структура зуба повреждается, происходит трансформация, позволяющая измерять и количественно определять деминерализацию эмали или дентина [18].

Проницаемость зуба увеличивается при наличии процесса деминерализации и связана с более низким электрическим сопротивлением. Дентин, в свою очередь, имеет более низкое сопротивление, чем эмаль, но его пористость также увеличивается из-за кариеса зубов, что приводит к снижению сопротивления [19].

Технология ACIST используется в устройстве CariescanPRO™. Производитель рекомендует использовать его для диагностики кариеса без кавитации на начальной стадии [20]. Во время обследования к зубу применяются несколько частот переменных токов, что приводит к генерации спектра точек импеданса. Результат измерения анализируется встроенным в устройство программным обеспечением и отображается как в числовом виде по шкале от 0 до 100, так и посредством цветовой кодировки от зеленого до красного [21]. Таким образом, CariescanPRO™ обеспечивает объективную количественную оценку деминерализации в твердых тканях зуба.

Технология ACIST имеет гораздо более высокую чувствительность и специфичность, чем любой другой диагностический метод, для идентификации деминерализации эмали [18]. При использовании CariescanPRO™ становится возможным первоначально провести реминерализующее вмешательство, а к инвазивным мерам приступить только в случае прогрессирующего процесса [21].

Последние исследования показали достоверность и точность диагностики деминерализации эмали с помощью устройств спектроскопии импеданса переменного тока. Сделан вывод, что CariescanPRO™ является воспроизводимым и точным диагностическим инструментом, который может быть ценным дополнением к визуальному осмотру [22–24]. Однако его не рекомендуют использовать у пациентов с кардиостимуляторами и для оценки вторичного кариеса и кариеса корня [20].

При диагностической оценке на основе значений биоимпеданса проводится сопоставление полученных данных с клиническим эталоном. Точка отсечения – значение, используемое для разделения непрерывных результатов на категории (обычно положительные и отрицательные). В этом случае положительность – наличие кариеса, тогда как отрицательность соответствует здоровому зубу. В литературе отсутствует согласие относительно использования точки отсечения с различными системами обнаружения. Результаты различных исследований могут сильно различаться в зависимости от того, какая точка отсечения используется, что исключает прямое сравнение различных систем [23]. Сложившаяся ситуация требует проведения дальнейших исследований.

Среди последних публикаций, посвященных разработке эквивалентных схем замещения для тканей зуба, следует отметить работу N. Herencsar et al. (2020), в которой проведено сравнительное моделирование для двух схем замещения (резистивных элементов и конденсаторов), обладающих одинаковым количеством элементов. Авторами представлена эквивалентная сеть, которая может быть реализована с использованием значений RC-компонентов, соответствующих стандарту Electronic Industries Alliance (EIA), для имитации характеристик электрического импеданса тканей зуба [25].

При продолжающемся изучении моделей эквивалентных цепей дробного порядка для представления данных биологических тканей важно исследовать, какие модели и параметры моделей наиболее тесно связаны с клинически значимыми маркерами и физиологическими структурами измеряемых тканей/материалов.

Цель исследования. Исследование частотных характеристик импеданса *in vitro* до деминерализации эмали и после нее, а также разработка электрической схемы замещения, адекватно описывающей электромагнитные процессы в тканях зуба.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном пилотном экспериментальном исследовании частотных характеристик (ЧХ) импеданса проводились изучение *in vitro* 15 интактных моляров. Критерии включения биопрепаратов зубов в исследование:

1) Зубы, удаленные по ортодонтическим показаниям: были включены только интактные зубы без кариозных поражений или структурных дефектов, для обеспечения однородности структуры эмали.

2) Отсутствие на структуре эмали зубов предыдущих реставраций или обработок – без пломбировочного материала, герметиков или отбеливающих обработок.

3) Похожая возрастная группа: возраст пациентов был выбран от 18 до 44 лет, чтобы минимизировать различия в минерализации эмали.

Фокус исследования биопрепаратов зубов включал измерение частотной зависимости импеданса в точке, расположенной на коронковой части зуба недалеко от пришеечной области щечной поверхности до (неповрежденная зона эмали) и после (перифокальная зона) деминерализации в течение 12 часов гелем ортофосфорной кислоты 35%. Для обеспечения того, чтобы деминерализации подвергались только щечные поверхности, а на остальных участках сохранялась здоровая эмаль, зубы покрывали кислотостойким лаком, на который не влиял деминерализационный раствор. Пилотный вариант экспериментального исследования включал временной интервал деминерализации 12 часов, который позволяет зафиксировать начальные структурные очаги деминерализации. В свою очередь более пролонгированная выдержка биоматериалов в деминерализующем геле способствует значительному разрушению структуры эмали, в то время как погружение биоматериалов в более короткие сроки способствует формированию матовой и меловидной эмали без видимых структурных повреждений [26].

Измерения комплексного сопротивления проводились с использованием измерителя иммитанса E7-20, который позволяет проводить измерения импеданса в частотном диапазоне до 1 МГц. Поскольку оценочные значения импеданса зуба составляют порядка 1 МОм [27], для получения достоверной информации об измеряемых величинах необходимо, чтобы внутреннее емкостное сопротивление системы измерения (самого прибора и датчика) было хотя бы на порядок выше этого значения.

Учитывая, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте, данное условие накладывает ограничения на частотный диапазон, применимый для каждой измерительной системы. Даже при крайне низком значении емкости, составляющем 2 пФ (что соответствует емкости между двумя проводниками длиной 5 см, расположенными на расстоянии 2 мм друг от друга), диапазон частот, пригодных для корректных измерений, ограничен величиной

100 кГц. На результаты измерений в этом диапазоне не оказывают существенного влияния параметры самого датчика. Разработанный датчик, предназначенный для исследования импеданса тканей зуба, полностью соответствует указанным требованиям [28].

Предварительные исследования показали, что:

1. Для создания условий при измерении *in vitro* аналогичных *in vivo*, необходимо, чтобы все микропоры образца были заполнены жидкостью, электромагнитные (ЭМ) характеристики которой были близки к дентинной жидкости.

2. При проведении измерений импеданса зуба, извлечённого из пробирки, наблюдается увеличение значения сопротивления с течением времени, что обусловлено постепенным оттоком жидкости из микропор тканей зуба.

3. В некоторых случаях наблюдается изменение значений импеданса при его измерениях в одной и той же области.

4. Результаты измерений существенно зависят от места расположения электродов относительно жевательной поверхности зуба.

С учетом результатов предварительных исследований была разработана методика проведения экспериментов в условиях *in vitro*. Методика включала в себя:

1. В качестве дентинной жидкости использовался физиологическим раствором (возможность такой замены связана с их близкими ЭМ-характеристиками [16]).

2. Перед проведением измерений образец хранился не менее 24 часов в отдельной пробирке с физиологическим раствором (наши исследования показали, что в течении первых 3 часов значение импеданса уменьшалось в 2-3 раза, в дальнейшем скорость уменьшения импеданса становилась меньше, и после 24 часов пребывания в физрастворе измеренное значение импеданса оставалось практически постоянным).

3. Непосредственно перед проведением исследований поверхность образца, на которую устанавливались электроды, высушивалась, что позволяло избежать ошибок измерений, связанных с протеканием тока по тонкому слою жидкости на поверхности зуба.

4. Непосредственно перед проведением исследований на измерительные электроды наносился проводящий гель. В состав геля входили вода, карбомер, глицерин, пропиленгликоль, консерванты.

5. В процессе проведения измерений создавались условия, при которых поток жидкости физиологически непрерывно поступал к исследуемой поверхности.

6. Электроды устанавливались в выбранной области поверхности зуба, проводилась фотофиксация их расположения.

7. Измерения значения импеданса в каждой точке исследуемого частотного диапазона проводились 10 раз.

В случае, если значение импеданса зуба существенно (более 15%) отличалось от средних значений для данного типа зубов, зуб не участвовал в дальнейших исследованиях.

После проведения экспериментов на исследуемой области зуба создавалось деминерализационное пятно путем нанесения на поверхность образца геля для травления на 12 часов и проводились повторным измерением частотной зависимости импеданса.

Экспериментальные результаты (значения модуля импеданса на каждой из исследуемых частот были статистически обработаны, определены средние значения величин и их стандартные отклонения при выборе уровня значимости 0,05. При проведении расчетов использовался параметрический критерий статистической обработки (критерий Стьюдента).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эмаль и дентин представляют собой минерализованные ткани, основным компонентом которых являются кристаллы гидроксиапатита, обладающего диэлектрическими свойствами. Эмаль и дентин различаются плотностью упаковки кристаллов гидроксиапатита, а также структурной организацией. Дентин характеризуется наличием дентинных канальцев. Внутри канальцев находятся дентинная жидкость и отростки одонтобластов. Если на поверхности зуба расположить электроды, куда подано напряжение, через ткани зуба будет протекать ток, который условно можно разделить на две составляющие: ток проводимости и ток смещения. Ток проводимости связан с движением заряженных частиц. Он может протекать только через проводящие материалы. Ток смещения связан с изменением электрического поля во времени. Он протекает через диэлектрические материалы. Протекание электрического тока проводимости (I_R) в тканях зуба осуществляется через их проводящие структуры: преимущественно через поры эмали, дентинную жидкость, отростки одонтобластов и ткань пульпы. Не зависящее от частоты значение этой части тока определяется геометрическими параметрами, такими как размеры и средняя плотность пор в эмали и дентине, и электропроводностью дентинной жидкости и ткани пульпы зуба.

Ток смещения (I_C) замыкается через диэлектрические составляющие структуры зуба. Его значение увеличивается с ростом частоты. Вследствие присутствия в структуре зуба как проводящих, так и диэлектрических компонентов, изменение частоты воздействующего электрического сигнала приводит к вариациям суммарного тока, что, в свою очередь, обуславливает изменение импеданса зуба. Результаты экспериментальных исследований тока, протекающего через зуб при постоянном входном напряжении (U) и разных частотах (f) воздействия, удобно описывать с помощью такого параметра как импеданс (комплексное сопротивление), модуль которого определяется по формуле:

$$Z(f) = U / \sqrt{I_{R2} + I_{C2}}, \text{ где } Z(f) - \text{модуль импеданса}$$

Значение импеданса зуба зависит от тока проводимости, то есть от геометрических параметров проводящих структур (размеры и средняя плотность пор в эмали и дентине) и проводимости жидкости в этих структурах, и тока смещения. При одинаковых частотах и свойствах заполняющих поры жидкостей значение импеданса обратно пропорционально размерам и плотности пор исследуемой ткани. Поскольку результаты измерений значений импеданса связаны с размерами и плотностью пор ткани, зафиксированное значение импеданса, которое значительно меньше среднего значения для данного типа зуба, свидетельствует о структурных изменениях в тканях зуба, характерных для начального кариеса. Измерения, выполняемые на разных частотах, позволяют существенно увеличить достоверность получаемых результатов, а также позволяют избавиться от процессов электролиза на поверхности электродов и от влияния на результаты исследований параметров (толщина и состав окислов) оксидных пленок на поверхности электродов. Зависимость модуля импе-

данса от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) импеданса.

Общая картина протекания токов проводимости и смещения в зубе с учетом строения и свойств всех перечисленных тканей представлена на рисунке 1.

На основе современного представления о структуре зуба и возможных путях протекания тока через элементы этой структуры была предложена схема замещения тканей зуба. В этой схеме замещения (рис. 2) электромагнитные процессы в эмали описываются элементами C2, C3, R6, R7, R8, R9; в дентине – элементами C1, C4, R2, R3, R4, R5; в пульпе – R1.

В схеме замещения с помощью резистивного элемента R1 учитываются процессы протекания тока проводимости через одонтобласты и ткани пульпы. Элементы R7 и R8 моделируют ток проводимости, протекающий через микропространства эмали, заполненные жидкостью. Часть микропор эмали не достигает дентинно-эмалевой границы. За описание процесса протекания тока в этих порах отвечают резистивные элементы R6 и R9. Ток проводимости, про-

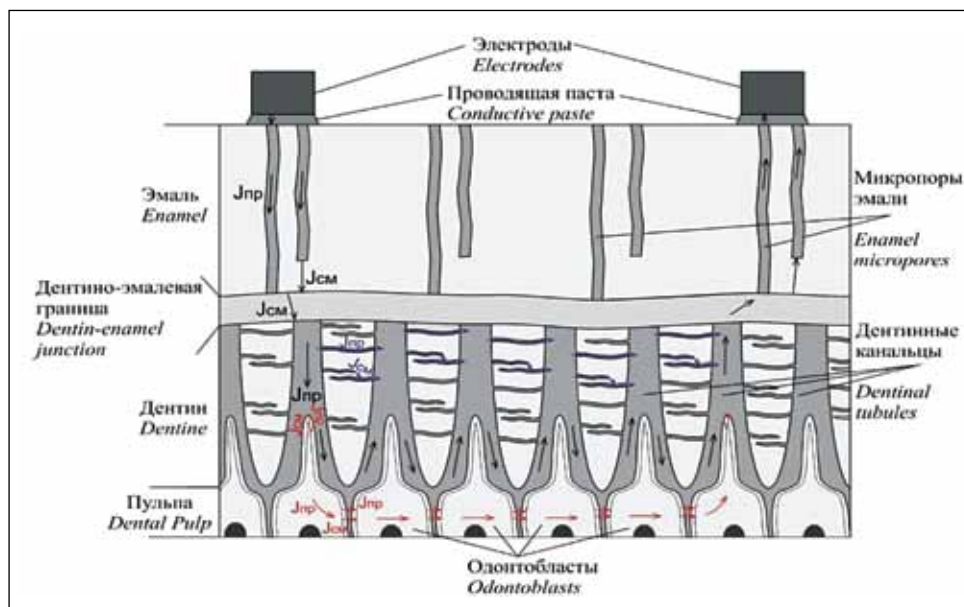


Рис. 1.

Схематическое представление структуры тканей зуба и путей протекания токов проводимости и смещения (источник: составлено авторами)

Fig. 1.

Schematic representation of dental tissue structure and pathways of conduction and displacement currents (source: compiled by the authors)

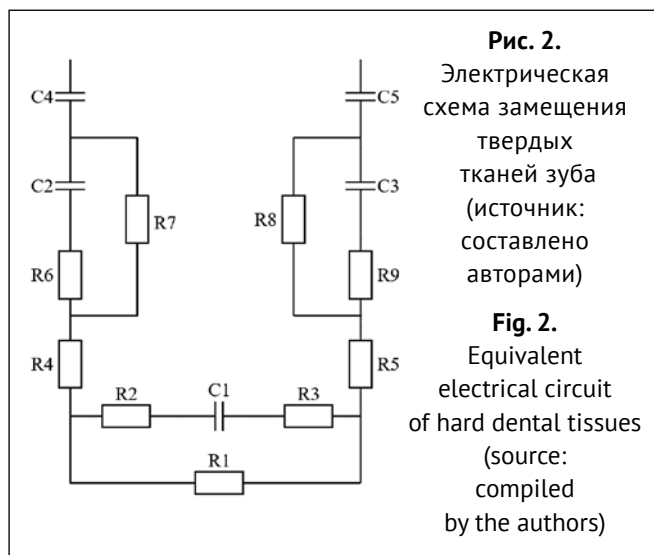


Рис. 2.

Электрическая схема замещения твердых тканей зуба (источник: составлено авторами)

Fig. 2.

Equivalent electrical circuit of hard dental tissues (source: compiled by the authors)

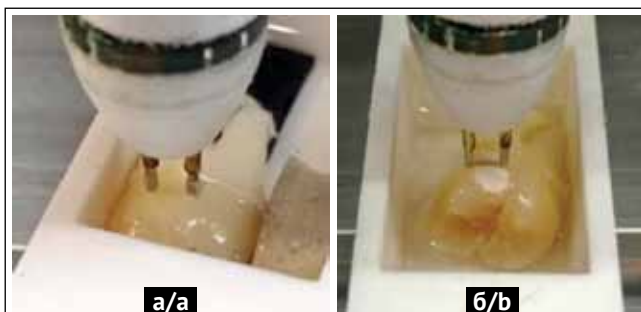


Рис. 3. Поверхность зуба до (а) и после (б) искусственного создания деминерализационного пятна (источник: составлено авторами)

Fig. 3. Tooth surface before (a) and after (b) artificial creation of a demineralization lesion (source: compiled by the authors)

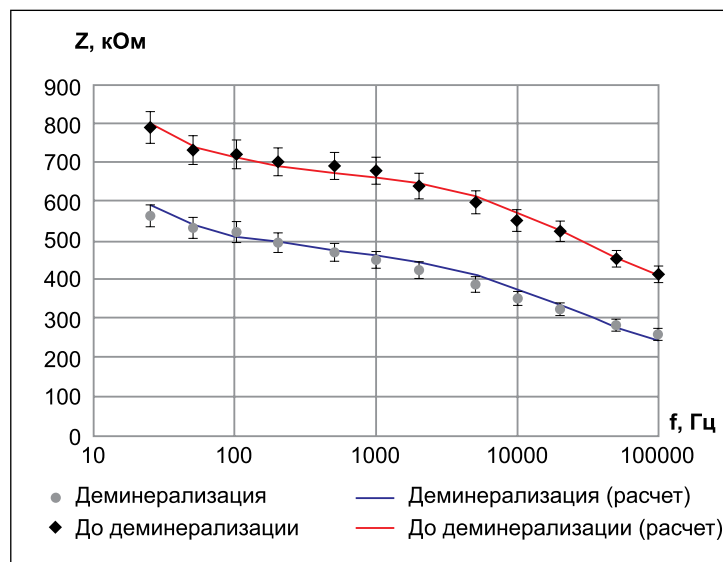


Рис. 4.
Экспериментальные
и расчетные частотные зависимости
импеданса моляров
в области до и после деминерализации
(источник: составлено авторами)

Fig. 4.
Experimental and simulated
frequency-dependent impedance
characteristics of molars
before and after demineralization
(source: compiled by the authors)

текающий через эти элементы, емкостным способом (JCM на рис. 1) замыкается на дентиноэмалевую границу. Этот процесс описывается емкостными элементами C2 и C3. Элементы R4 и R5 введены для описания резистивного сопротивления жидкости в дентинных канальцах. Одонтобласты ветвятся на всей толщине дентина, что приводит к появлению большого количества отростков, которые пронизывают пространство между дентинными канальцами. За протекание тока проводимости через эти отростки отвечают элементы R2-R3, при этом C1 отражает емкость, возникающую между отростками соседних дентинных трубочек. Влияние оксидного слоя, присутствующего на поверхности электродов, в схеме замещения учтено с помощью емкостных элементов C4 и C5.

Для каждого из образцов зубов была измерена АЧХ импеданса в области, где планировалось создание деминерализационного пятна. При исследовании одного образца было выявлено, что его частотная характеристика импеданса в области частот до 10 кГц отличается от среднего значения более чем на 20%. Этот зуб был отбракован и не принимал участие в дальнейших исследованиях, а его характеристики не учитывались при вычислении допустимых отклонений и среднего значения ЧХ импеданса. Отклонение импеданса от среднего для данной частоты значений для остальных 14 образцов не превышало 15%.

Для каждого из образцов зубов была измерена частотная зависимость импеданса. При исследовании одного образца было выявлено, что его частотная характеристика импеданса в области частот до 10 кГц отличается от среднего значения более чем на 20%. Этот зуб был отбракован и не принимал участие в дальнейших исследованиях, а его характеристики не учитывались при вычислении допустимых отклонений и среднего значения ЧХ.

Методика экспериментальных исследований включала процедуру искусственного создания деминерализационного пятна с повторным измерением частотной зависимости импеданса при установке

электродов в области пятна. Созданием пятна деминерализации моделировались условия, близкие к условиям, которые наблюдаются в случае начального кариеса. Измерения до и после деминерализации проводились в одной и той же области зуба. Это позволяет утверждать, что результаты измерений ЧХ импеданса можно связать с увеличением пористости – увеличением количества и размеров микропор эмали, которые наблюдаются при деминерализации. Фотографии одного из образцов до и после этой процедуры представлены на рисунке 3.

По результатам измерений были построены зависимости среднего значения и допустимых отклонений импеданса на каждой частоте как для intactных, так и для деминерализованных зубов (рис. 4). На каждой из исследуемых частот значения модуля импеданса были статистически обработаны: определены средние значения величин и их стандартные отклонения, величина которых указана в виде отрезков на рисунках. Все данные являются статистически значимыми по критерию Стьюдента, при выборе уровня значимости 0.05, за исключением результатов, полученных на частотах 20 и 50 Гц в результатах, полученных как до деминерализации, так и после нее.

Из рисунка 4 видно, что стандартные отклонения результатов исследования модуля импеданса до деминерализации и после нее не пересекаются. Данный факт свидетельствует о том, что результаты исследования модуля импеданса позволяют достоверно определить наличие деминерализации тканей зуба.

Конкретные значения параметров элементов схемы замещения выбирались таким образом, чтобы на каждой из исследуемых частот вычисляемое значение импеданса отличалось от среднего экспериментального значения не более чем на 5%. При этом топология схемы оставалась одинаковой как для intactных, так и для деминерализованных зубов. Найденные таким образом параметры отдельных элементов схемы замещения для области до и после деминерализации поверхности зуба представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры схемы замещения для области поверхности моляра до и после деминерализации (источник: составлено авторами)

Table 1. Parameters of the equivalent circuit for the molar surface before and after demineralization (source: compiled by the authors)

Параметр Parameter	До деминерализации Before demineralization	После деминерализации After demineralization
R1 (пульпа) / R1 (pulp)	160 кОм / 160 kΩ	160 кОм / 160 kΩ
R2 (дентин) / R2 (dentine)	60 кОм / 60 kΩ	60 кОм / 60 kΩ
R3 (дентин) / R3 (dentine)	60 кОм / 60 kΩ	60 кОм / 60 kΩ
R4 (дентин) / R4 (dentine)	30 кОм / 30 kΩ	30 кОм / 30 kΩ
R5 (дентин) / R5 (dentine)	30 кОм / 30 kΩ	30 кОм / 30 kΩ
R6* (эмаль) / R6* (enamel)	190 кОм / 190 kΩ	80 кОм / 80 kΩ
R7* (эмаль) / R7* (enamel)	240 кОм / 240 kΩ	140 кОм / 140 kΩ
R8* (эмаль) / R8* (enamel)	240 кОм / 240 kΩ	140 кОм / 140 kΩ
R9* (эмаль) / R9* (enamel)	190 кОм / 190 kΩ	80 кОм / 80 kΩ
C1 (дентин) / C1 (dentine)	$3 \cdot 10^{-10}$ Ф / $3 \cdot 10^{-10}$ F	$3 \cdot 10^{-10}$ Ф / $3 \cdot 10^{-10}$ F
C2* (эмаль) / C2* (enamel)	10^{-11} Ф / 10^{-11} F	$3 \cdot 10^{-11}$ Ф / $3 \cdot 10^{-11}$ F
C3* (эмаль) / C3* (enamel)	10^{-11} Ф / 10^{-11} F	$3 \cdot 10^{-11}$ Ф / $3 \cdot 10^{-11}$ F
C4 (дентин) / C4 (dentine)	$8 \cdot 10^{-8}$ Ф / $8 \cdot 10^{-8}$ F	$8 \cdot 10^{-8}$ Ф / $8 \cdot 10^{-8}$ F
C5	$8 \cdot 10^{-8}$ Ф / $8 \cdot 10^{-8}$ F	$8 \cdot 10^{-8}$ Ф / $8 \cdot 10^{-8}$ F

**изменившиеся параметры / *parameters marked with an asterisk indicate changes*

Полученные результаты свидетельствуют о том, что деминерализация гелем для травления в течение 12 часов приводит к существенному изменению ЧХ импеданса. Подобные изменения АЧХ импеданса, при использовании схемы замещения, можно получить, только уменьшив значения сопротивлений R6, R7, R8, R9 и увеличив значения емкостей C2 и C3. Подобные изменения параметров в реальных экспериментальных зубах связаны с увеличением количества и размеров микропор в эмали в результате ее деминерализации. В то же время параметры схемы замещения, связанные с дентином и его структурными элементами, остались неизменными (табл. 1). Полученные результаты моделирования процессов свидетельствуют о том, что деминерализация гелем для травления в течение 12 часов изменяет импеданс только эмали и не затрагивает электромагнитных характеристик дентина. Уменьшение значения импеданса эмали возможно объяснить только увеличением размеров микропор в ее структуре.

В таблице приведены результаты, с помощью которых при использовании предложенной схемы замещения были рассчитаны значения импеданса на исследуемых частотах. Результаты расчетов, выполненных с помощью этих значений, не выходят за рамки стандартных отклонений, определенных по результатам физических экспериментов.

На рисунке 4 представлены экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные по схеме замещения с использованием параметров из таблицы 1 частотные зависимости импеданса. Сравнение этих кривых показывает, что сама предложенная

электрическая схема замещения и рассчитанные в работе ее параметры адекватно описывают результаты измерения импеданса как до, так и после деминерализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований in vitro свидетельствует о том, что АЧХ импеданса моляров в области деминерализационного пятна оказывается на 35-60% меньше, чем его значения в этой же области до пятна. Конкретное значение того, на сколько именно уменьшилось значение импеданса, зависит от частоты, на которой проводятся измерения.

Статистически значимые отличия в значениях импеданса на частотах выше 100 Гц показывают, что спектроскопию импеданса можно использовать для диагностики деминерализации эмали зубов.

Предложена электрическая схема замещения, которая описывает ЭМ-процессы в тканях зуба и позволяет объяснить характер изменения ЧХ импеданса.

Путем сравнения результатов экспериментов и численного моделирования ЭМ-процессов в схеме замещения тканей зуба показано, что уменьшение измеренных значений импеданса зуба при деминерализации гелем для травления связано с уменьшением значения импеданса только в эмали зуба.

Уменьшение значения импеданса эмали при возникновении деминерализационного пятна возможно объяснить только увеличением размеров микропор в ее структуре. Деминерализация затрагивает ткани эмали и не затрагивает ткани дентина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Y, Xiang Y, Ren H, Zhang C, Hu Z, Leng W, Xia L. Association between periodontitis and dental caries: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*. 2024;28(6):306.
<https://doi.org/10.1007/s00784-024-05687-2>
2. Monjarás-Ávila AJ, Hardan L, Cuevas-Suárez CE, Alonso NVZ, Fernández-Barrera MÁ, Moussa C, et al. Systematic Review and Meta-Analysis of Remineralizing Agents: Outcomes on White Spot Lesions. *Bioengineering*. 2025;12(1):93.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering12010093>
3. Антонова ИН, Орехова ЛЮ, Гончаров ВД, Яшкардин РВ. Результаты исследования очага начального кариеса эмали зуба человека in vitro с помощью атомно-силовой микроскопии. *Стоматология*. 2023;102(5):20-26.
<https://doi.org/10.17116/stomat202310205120>
4. Гранько СА, Данилова ДВ, Белодед ЛВ. Диагностика начальных кариозных поражений твердых тканей зубов. *Современная стоматология*. 2017;(4):59-62. Режим доступа:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30796701>
5. Калашникова НП, Авраамова ОГ, Кулаженко ТВ, Горячева ВВ, Хохлова СВ. Современные аппаратные методы ранней диагностики кариеса зубов. *Стоматология*. 2022;101(1):89-95.
<https://doi.org/10.17116/stomat202210101189>
6. Kühnisch J, Aps JK, Splieth C, Lussi A, Jablonski-Momeni A, Mendes FM, et al. ORCA-EFCD consensus report on clinical recommendation for caries diagnosis. Paper I: caries lesion detection and depth assessment. *Clinical oral investigations*. 2024;28(4):227.
<https://doi.org/10.1007/s00784-024-05597-3>
7. Калайчев НВ, Булахова ИН, Петрова АП. Сравнение эффективности диагностики кариеса лазерно-флуоресцентным методом (KaVo Diagnodent) и другими стандартными и дополнительными методами диагностики. *Международный студенческий научный вестник*. 2018;(4-1):147-151. Режим доступа:
<https://s.ehuherald.ru/pdf/2018/4-1/18642.pdf>
8. Schwendicke F, Splieth C, Breschi L, Banerjee A, Fontana M, Paris S, et al. When to intervene in the caries process? An expert Delphi consensus statement. *Clinical Oral Investigations*. 2019;23(10):3691-3703.
<https://doi.org/10.1007/s00784-019-03058-w>
9. Mu Y, Wang Y, Huang L, Weng Z, Zhong T, Yu S, et al. Yellow light and ultrasound Dual-responsive strontium-doped zinc oxide composites for dental caries prevention and remineralization. *Bioactive Materials*. 2025; 47:403-416.
<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.01.029>
10. Sabti MY, Alfarhan IY, Akbar AA, Qudeimat MA. Evaluating Color Stability and Enamel Surface Roughness Following Resin Infiltration Treatment. *Clinical and Experimental Dental Research*. 2024;10(1): e2834.
<https://doi.org/10.1002/cre2.834>
11. de Oliveira Rocha A, Cardoso K, Goebel MC, Santos PS., Dos Anjos LM, Ribeiro JS, et al. A global overview of enamel microabrasion for white spot lesions: a bibliometric review. *Restorative Dentistry & Endodontics*. 2024;49(3):e29.
<http://dx.doi.org/10.5395/rde.2024.49.e29>
12. Kwaśny M, Bombalska A. Applications of Laser-Induced Fluorescence in Medicine. *Sensors*. 2022;22(8):2956.
<https://doi.org/10.3390/s22082956>
13. Marmaneu-Menero A, Iranzo-Cortes JE, Almerich-Torres T, Ortola-Siscar JC, Montiel-Company JM, Almerich-Silla JM. Diagnostic Validity of Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI) and Near-Infrared Light Transillumination (NILT) for Caries in Dentine. *Journal of clinical medicine*. 2020;9:420.
<https://doi.org/10.3390/jcm9020420>
14. Макеева ИМ, Волков АГ, Прикул ВФ, Дикопова НЖ, Аракелян МГ, Макеева МК, Ручкин ДН. Эффективность электроодонтодиагностики с помощью различных видов тока. *Стоматология*. 2018;97(6):34-37.
<https://doi.org/10.17116/stomat20189706134>
15. Кожевникова АИ, Колягина АА. Электроодонтодиагностика в повседневной практике врача-стоматолога. *Бюллетень медицинских интернет-конференций*. 2016;6(5):864-867. Режим доступа:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27462344>
16. Иванова ГГ, Жорова ТН. Исследование среднестатистического показателя электропроводности твердых тканей зубов с момента их прорезывания в динамике с целью диагностики патологических процессов зубов с незаконченной минерализацией эмали. *Институт стоматологии*. 2020;88(3):87-90. Режим доступа:
<https://elibrary.ru/item.asp?id=44076261>
17. Mainkar A, Kim SG. Diagnostic Accuracy of 5 Dental Pulp Tests: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of endodontics*. 2018;44(5):694-702.
doi: 10.1016/j.joen.2018.01.021
18. AbdELkader A, Hafez Ibrahim S, Elsayed Hassanein O. Reliability of impedance spectroscopy versus digital radiograph and ICDAS-II in occlusal caries detection: a prospective clinical trial. *Scientific Reports*. 2024;14(1):16553.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.021>
19. Pretty IA, Ellwood RP. The caries continuum: Opportunities to detect, treat and monitor the remineralization of early caries lesions. *Journal of Dentistry*. 2013;41(Supplement 2):S12-S21.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.04.003>
20. Kockanat A, Unal M. In vivo and in vitro comparison of ICDAS II, DIAGNOdent pen, CarieScan PRO and SoproLife camera for occlusal caries detection in primary molar teeth. *European journal of paediatric dentistry*. 2017;18(2):99-104.
<https://doi.org/10.23804/ejpd.2017.18.02.03>
21. Jablonski-Momeni A, Heinzl-Gutenbrunner M, Haak R, Krause F Use of AC impedance spectroscopy for monitoring sound teeth and incipient carious lesions.

Clinical Oral Investigations. 2017;21(8):2421-2427.

<https://doi.org/10.1007/s00784-016-2038-2>

22. Sannino I, Lombardo L, Angelini E, Parvis M, Arpaia P, Grassini S. Preliminary impedance spectroscopy study for carious lesions detection. In 2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (pp. 1-6).

<https://doi.org/10.1109/MeMeA54994.2022.9856542>

23. Melo M, Pascual A, Camps I, Ata-Ali F, Ata-Ali J. Impedance Spectroscopy as a Tool for the Detection of Occlusal Noncavitated Carious Lesions. *Operative Dentistry*. 2022;47(3):258-267.

<https://doi.org/10.2341/19-149-c>

24. İpek İ, Öznurhan F, Derdiyok C, Şengül BK. Diagnostic Comparison of Different Methods for Detection of Occlusal Caries Lesions in New Erupted Permanent Teeth. *Current Research in Dental Sciences*. 2025;35(1):71-74.

<https://doi.org/10.17567/currresdentsci.1617451>

25. Herencsar N, Freeborn TJ, Kartci A, Cicekoglul O. A Comparative Study of Two Fractional-Order Equivalent

Electrical Circuits for Modeling the Electrical Impedance of Dental Tissues. *Entropy (Basel)*. 2020;22(10):1117.

<https://doi.org/10.3390/e22101117>

26. Kolumban A, Moldovan M, Țig IA, Chifor I, Cuc S, Bud M, et al. An Evaluation of the Demineralizing Effects of Various Acidic Solutions. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8270.

<https://doi.org/10.3390/app11178270>

27. Gorelikova MA, Zharikova V, Kuznetsova TA. Study of Impedance Frequency Dependences of Healthy and Depulped Teeth. *2023 Seminar on Digital Medical and Environmental Systems and Tools (DMEST) (2023):35-38*.

<https://doi.org/10.1109/DMEST60476.2023.10339623>

28. Gorelikova MA, Goncharov VD, Yashkardin RV, Gerasimenko AE. Effects of the Measuring Sensors Frequency Response on the Interpretation of the Results of the Impedance Measuring of Hard Tooth Tissues. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2021:1756-1759.

<http://dx.doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396345>

REFERENCES

1. Li Y, Xiang Y, Ren H, Zhang C, Hu Z, Leng W, Xia L. Association between periodontitis and dental caries: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*. 2024;28(6):306.

<https://doi.org/10.1007/s00784-024-05687-2>

2. Monjarás-Ávila AJ, Hardan L, Cuevas-Suárez CE, Alonso NVZ, Fernández-Barrera MÁ, Moussa C, et al. Systematic Review and Meta-Analysis of Remineralizing Agents: Outcomes on White Spot Lesions. *Bioengineering*. 2025;12(1):93.

<https://doi.org/10.3390/bioengineering12010093>

3. Antonova I.N., Orekhova L.Yu., Goncharov V.D., Yashkardin R.V. The results of the study of the focus of initial caries of human tooth enamel in vitro using atomic force microscopy. *Stomatology*. 2023;102(5):20-26 (In Russ.).

<https://doi.org/10.17116/stomat202310205120>

4. Granko S.A., Danilova D.V., Beloded V. Diagnosis of initial carious lesions of hard tooth tissues. *Sovremennaya stomatologiya*. 2017;69(4):59-62 (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30796701>

5. Kalashnikova N.P., Avraamova O.G., Kulajenko T.V., Goryacheva V.V., Khokhlova S.V. Modern instrumental methods for early diagnosis of dental caries. *Stomatology*. 2022;101(1):89-95 (In Russ.).

<https://doi.org/10.17116/stomat202210101189>

6. Kühnisch J, Aps JK, Splieth C, Lussi A, Jablonski-Momeni A, Mendes FM, et al. ORCA-EFCD consensus report on clinical recommendation for caries diagnosis. Paper I: caries lesion detection and depth assessment. *Clinical oral investigations*. 2024;28(4):227.

<https://doi.org/10.1007/s00784-024-05597-3>

7. Kalaichev N.V., Bulakhova I.N., Petrova A.P. Comparison of the diagnostic efficiency of caries with a laser-fluorescent method (KaVo diagnodent) and other standard and additional diagnostic methods. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2018;(4-1):147-

151 (In Russ.). Available from:

<https://s.eduherald.ru/pdf/2018/4-1/18642.pdf>

8. Schwendicke F, Splieth C, Breschi L, Banerjee A, Fontana M, Paris S, et al. When to intervene in the caries process? An expert Delphi consensus statement. *Clinical Oral Investigations*. 2019;23(10):3691-3703.

<https://doi.org/10.1007/s00784-019-03058-w>

9. Mu Y, Wang Y, Huang L, Weng Z, Zhong T, Yu S, et al. Yellow light and ultrasound Dual-responsive strontium-doped zinc oxide composites for dental caries prevention and remineralization. *Bioactive Materials*. 2025;47:403-416.

<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.01.029>

10. Sabti MY, Alfarhan IY, Akbar AA, Qudeimat MA. Evaluating Color Stability and Enamel Surface Roughness Following Resin Infiltration Treatment. *Clinical and Experimental Dental Research*. 2024;10(1):e2834.

<https://doi.org/10.1002/cre2.834>

11. de Oliveira Rocha A, Cardoso K, Goebel MC, Santos PS, Dos Anjos LM, Ribeiro JS, et al. A global overview of enamel microabrasion for white spot lesions: a bibliometric review. *Restorative Dentistry & Endodontics*. 2024;49(3):e29.

<http://dx.doi.org/10.5395/rde.2024.49.e29>

12. Kwaśny M, Bombalska A. Applications of Laser-Induced Fluorescence in Medicine. *Sensors*. 2022;22(8):2956.

<https://doi.org/10.3390/s22082956>

13. Marmaneu-Menero A, Iranzo-Cortes JE, Almerich-Torres T, Ortola-Siscar JC, Montiel-Company JM, Almerich-Silla JM. Diagnostic Validity of Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI) and Near-Infrared Light Transillumination (NILT) for Caries in Dentine. *Journal of clinical medicine*. 2020;9:420.

<https://doi.org/10.3390/jcm9020420>

14. Makeeva I.M., Volkov A.G., Prikuls V.F., Dikopova N.Zh., Arakelian M.G., Makeeva M.K., Ruchkin D.N. The efficacy of electroodontodiagnosis by means of various

types of current. *Stomatology*. 2018;97(6):34-37 (In Russ.).

<https://doi.org/10.17116/stomat20189706134>

15. Kozhevnikova A.I., Kolyagina A.A. Electroodontodiagnosics in the daily practice of a dentist. *Bulletin of medical Internet conferences*. 2016;6(5):864-867 (In Russ.). Available from:

<https://elibrary.ru/item.asp?id=27462344>

16. Ivanova G.G., Zhorova T.N. Study of the statistical average electrical conductivity of hard dental tissues from the moment of their eruption in dynamics in order to diagnose pathological processes of teeth with unfinished mineralization of enamel. *The dental institute*. 2020;88(3):87-90 (In Russ.). Available from:

<https://elibrary.ru/item.asp?id=44076261>

17. Mainkar A, Kim SG. Diagnostic Accuracy of 5 Dental Pulp Tests: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of endodontics*. 2018;44(5):694-702.

<https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.021>

18. AbdElkader A, Hafez Ibrahim S, Elsayed Hassanein O. Reliability of impedance spectroscopy versus digital radiograph and ICDAS-II in occlusal caries detection: a prospective clinical trial. *Scientific Reports*. 2024;14(1):16553.

<https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.021>

19. Pretty IA, Ellwood RP. The caries continuum: Opportunities to detect, treat and monitor the remineralization of early caries lesions. *Journal of Dentistry*. 2013;41(Supplement 2):S12-S21.

<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.04.003>

20. Kockanat A, Unal M. In vivo and in vitro comparison of ICDAS II, DIAGNOdent pen, CarieScan PRO and SoproLife camera for occlusal caries detection in primary molar teeth. *European journal of paediatric dentistry*. 2017;18(2):99-104.

<https://doi.org/10.23804/ejpd.2017.18.02.03>

21. Jablonski-Momeni A, Heinzel-Gutenbrunner M, Haak R, Krause F Use of AC impedance spectroscopy for monitoring sound teeth and incipient carious lesions. *Clinical Oral Investigations*. 2017;21(8):2421-2427.

<https://doi.org/10.1007/s00784-016-2038-2>

22. Sannino I, Lombardo L, Angelini E, Parvis M, Arpaia P, Grassini S. Preliminary impedance spectroscopy study for carious lesions detection. In 2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (pp. 1-6).

<https://doi.org/10.1109/MeMeA54994.2022.9856542>

23. Melo M, Pascual A, Camps I, Ata-Ali F, Ata-Ali J. Impedance Spectroscopy as a Tool for the Detection of Occlusal Noncavitated Carious Lesions. *Operative Dentistry*. 2022;47(3):258-267.

<https://doi.org/10.2341/19-149-c>

24. İpek İ, Öznurhan F, Derdiyok C, Şengül BK. Diagnostic Comparison of Different Methods for Detection of Occlusal Caries Lesions in New Erupted Permanent Teeth. *Current Research in Dental Sciences*. 2025;35(1):71-74.

<https://doi.org/10.17567/currresdentsci.1617451>

25. Herencsar N, Freeborn TJ, Kartci A, Cicekoglu O. A Comparative Study of Two Fractional-Order Equivalent Electrical Circuits for Modeling the Electrical Impedance of Dental Tissues. *Entropy (Basel)*. 2020;22(10):1117.

<https://doi.org/10.3390/e22101117>

26. Kolumban A, Moldovan M, Țig IA, Chifor I, Cuc S, Bud M, et al. An Evaluation of the Demineralizing Effects of Various Acidic Solutions. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8270.

<https://doi.org/10.3390/app11178270>

27. Gorelikova M.A., Zharikova V., Kuznetsova T.A. Study of Impedance Frequency Dependences of Healthy and Depulped Teeth. *2023 Seminar on Digital Medical and Environmental Systems and Tools (DMEST) (2023):35-38*.

<https://doi.org/10.1109/DMEST60476.2023.10339623>

28. Gorelikova M.A., Goncharov V.D., Yashkardin R.V., Gerasimenko A.E. Effects of the Measuring Sensors Frequency Response on the Interpretation of the Results of the Impedance Measuring of Hard Tooth Tissues. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2021:1756-1759.

<http://dx.doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396345>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончаров Вадим Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: vdgoncharov@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6627-4723>

Гореликова Мария Андреевна, ассистент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: gorelikovam27@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-4609>

Шадрина Кристина Вадимовна, ассистент кафедры стоматологии терапевтической и пародонтологии

Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: shadrina192@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-3665>

Орехова Людмила Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой стоматологии терапевтической и пародонтологии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова, почетный президент Российской пародонтологической ассоциации, генеральный директор ООО «Городской пародонтологический центр ПАКС», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: prof_orekhova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8026-0800>

Березкин Виктор Дмитриевич, студент 5 курса стоматологического факультета Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: victorberezkin.spb@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7562-4997>

Немовская Елена Сергеевна, студентка 5 курса стоматологического факультета Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: lenanemovskaa@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4962-617X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim D. Goncharov, PhD, DSc, Professor, Department of the Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: vdgoncharov@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6627-4723>

Maria A. Gorelikova, Assistant Professor, Department of the Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: gorelikovam27@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-4609>

Kristina V. Shadrina, DMD, Assistant Professor, Department of the Restorative Dentistry and Periodontology, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: shadrina192@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-3665>

Liudmila Yu. Orekhova, DMD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department Restorative Dentistry and Periodontology, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Honorary President of the RPA, general manager of City Periodontal Center "PAKS" Ltd., Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: prof_orekhova@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8026-0800>

Вклад авторов в работу. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE, а также согласны принять на себя ответственность за все аспекты работы. Гончаров В. Д. – разработка методологии, научное и административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов; Гореликова М. А. – проведение исследования, написание черновика рукописи, формальный анализ; Шадрина К. В. – проведение исследования, написание черновика рукописи, формальный анализ; Орехова Л. Ю. – разработка концепции и методологии, научное и административное руководство исследовательским проектом; Березкин В. Д. – валидация результатов; Немовская Е. С. – валидация результатов; Петров А. А. – визуализация, написание черновика, формальный анализ.

Автор, ответственный за связь с редакцией:

Петров Александр Александрович, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры стоматологии терапевтической и пародонтологии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для переписки: paa_stom@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8813-4577>

Victor D. Berezkin, 5th year student, Dental School, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Russian Federation, Saint Petersburg

For correspondence: victorberezkin.spb@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7562-4997>

Elena S. Nemovskaya, 5th year student, Dental School, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Russian Federation, Saint Petersburg

For correspondence: lenanemovskaa@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4962-617X>

Corresponding author:

Alexander A. Petrov, DMD, PhD, Assistant Professor, Department of the Restorative Dentistry and Periodontology, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation

For correspondence: paa_stom@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8813-4577>

Поступила / Article received 21.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 25.06.2025

Принята к публикации / Accepted 17.07.2025

мовская Е. С. – валидация результатов; Петров А. А. – визуализация, написание черновика, формальный анализ.

Authors' contribution. All authors confirm that their contributions comply with the international ICMJE criteria and agrees to take responsibility for all aspects of the work. Goncharov V. D. – methodology, project administration, resources; Gorelikova M. A. – investigation, writing – original draft preparation, formal analysis; Shadrina K. V. – investigation, writing – original draft preparation, formal analysis; Orekhova L. Yu. – conceptualization, methodology, project administration; Berezkin V. D. – validation; Nemovskaya E. S. – validation; Petrov A. A. – visualization writing – original draft preparation, formal analysis.