

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.123

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ В СТОМАТОЛОГИИ

© 2022 г. В. Э. Касаткин¹, *, А. К. Аджиева², **, И. В. Касаткина¹, Р. Х. Залавутдинов¹

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

²Дагестанский государственный медицинский университет, Махачкала, Россия

*e-mail: vadim_kasatkin@mail.ru

**e-mail: aygul.stom@gmail.com

Поступила в редакцию 11.12.2020 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 14.06.2022 г.

При помощи физико-химических методов, включающих спектроскопию электрохимического импеданса, оптическую и сканирующую зондовую микроскопию с микроанализом исследован процесс реминерализации твердых тканей зуба при помощи электрофореза препаратом “БВ”, обеспечивающим формирование осадка фосфата кальция (брушита) при взаимодействии его компонентов. В экспериментах *in vitro* показано, что электрическое сопротивление зуба может служить критерием эффективности блокировки дентинных канальцев формирующимся осадком брушита. Проведена оценка глубины зоны реминерализации при обработке препаратом “БВ” методом аппликаций и с использованием электрофореза. Установлено, что последний метод обладает большей эффективностью, как по степени блокировки канальцев, так и по глубине проникновения в твердые ткани зуба. На базе этих исследований разработан способ лечения зубов с витальной пульпой, показавший высокую эффективность на пациентах контрольной группы.

Ключевые слова: стоматология, реминерализация, дентин, электрофорез, импедансометрия, сканирующая микроскопия

DOI: 10.31857/S0044185622050096

ВВЕДЕНИЕ

Повышенная чувствительность твердых тканей зубов является одним из наиболее распространенных стоматологических заболеваний и, по данным ВОЗ, ее распространенность неуклонно растет [1]. Пожалуй, нет ни одного человека, которому не знаком дискомфорт при контакте зубов с горячей, холодной или кислой пищей. В случаях повышенной чувствительности зубов (гиперестезии) эти явления представляют серьезную проблему, относящуюся к некариозным поражениям твердых тканей зубов. Причиной гиперестезии являются изменения в составе и/или структуре дентина, твердой ткани зуба, составляющей его основную часть. Среди нескольких теорий, объясняющих причины повышенной чувствительности зубов, наиболее распространена гидродинамическая теория, которая связывает этот процесс с изменениями циркуляции жидкой фазы в дентинных канальцах, пронизывающих объем ткани. Это может вызывать смещения клеток одонтобластов и раздражение нервных окончаний [2].

Гиперестезия дентина может быть вызвана различными причинами, среди которых дефекты и сколы эмали, эрозия в результате воздействия механических или химических факторов, явления пародонтоза, отбеливания зубов, а также процедуры обтачивания зубов при протезировании. В результате этих процессов происходит обнажение дентинных канальцев.

Одним из методов лечения гиперестезии является применение препаратов, вызывающих образование малорастворимых осадков на поверхности и внутри обнаженного дентина [3, 4]. Обычно используют различные гели, лаки и пасты, дающие плотные достаточно устойчивые пленки на поверхности и блокирующие контакт “внешней среды” с канальцами. Также используют химические агенты, образующие прочные малорастворимые соединения непосредственно с тканями дентина (как органической, так и неорганической природы). Среди них прополис [5], фториды [6], препараты стронция, кальция, фосфаты и др. [7–10]. В данной работе исследовали эффективность препарата “БВ” [11] для обработки очагов

деминерализации твердых тканей зубов при некариозных поражениях. Он представляет собой двухкомпонентную систему, формирующую при взаимодействии 30% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (раствор № 1) и 30% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (раствор № 2) кристаллы брусита (CaHPO_4) на поверхности дентина, блокирующих движение жидкости в дентинных трубочках. Этот осадок сходен по природе с гидроксипатитом, из которого главным образом состоит минеральная часть дентина и поэтому хорошо реминерализует поврежденные участки ткани зуба.

Как правило, при выборе методов лечения гиперстензии основываются на статистической обработке результатов применения выбранного препарата для различных групп пациентов с ее проявлениями. Однако, в конкретном случае исследуемого препарата “БВ”, формирующего блокирующие осадки брусита в устьях дентинных канальцев, имеется возможность применить физико-химические методики исследования структуры и свойств микропористых объектов, к которым можно отнести дентин, пронизанный канальцами с различной проницаемостью. Среди этих методов были выбраны измерения электрического импеданса и сканирующая электронная микроскопия (РСМА) с возможностью определения локального состава выбранных участков объекта исследования *in vitro*.

Очевидно, что импеданс (комплексное электрическое сопротивление) пористого объекта, образованного плохо проводящей основой зуба (состоящей преимущественно из гидроксипатита) и заполняющим его пористую структуру водным электролитом, будет зависеть от степени проницаемости канальцев и может служить количественным макро критерием при оценке эффективности блокировки микропор малорастворимым осадком. Напротив, сканирующая микроскопия может дать точную локальную информацию о пространственном распределении наносимого осадка, его структуре и элементном составе. Кроме того, с ее помощью можно исследовать особенности строения объекта, как в поверхностном слое, так и по глубине.

Объекты и методики исследования

Объектами лабораторного исследования *in vitro* служили образцы зубов, удаленные по пародонтологическим показаниям. Чтобы предотвратить вымывание гидроксипатита из тканей зуба и стандартизировать их состояние, перед проведением исследований препарированные зубы предварительно замачивали на 30 мин в минеральной воде (Новотерская целебная, минерализация, 3.2–5.8 г/л). В экспериментах по измерению импеданса использовали зубы целиком. При исследовании с помощью РСМА применяли поперечные шлифы и сколы фрагментов зубов.

В данной работе исследовали эффективность применения препарата “БВ” при использовании его в сочетании с электро-ионофорезом. Для проведения электрофореза была разработана и изготовлена экспериментальная модель прибора, представляющего собой биполярный гальваностат с регулируемым уровнем тока (± 10 мкА) и встроенным таймером [12].

Для локального подведения электрического тока в зоны обрабатываемого зуба использовали временную пластмассовую коронку, снабженную встроенным электродом и полостью, куда помещался тампон с пропиткой активным компонентом [13]. Активный электрод гальваностата в виде углового зонда контактировали с металлическим стержнем временной коронки. В клинике пассивный электрод в виде пластины удерживался в ладони правой руки или фиксировался на губе пациента, а в лабораторных опытах контактировал с электропроводящей средой модельной ячейки. Подавали постоянный электрический ток от 2 до 5 мкА в течение 2 мин.

Лабораторная ячейка для моделирования процессов электро-ионофореза и импедансометрии на удаленном зубе должна была обеспечить надежную фиксацию объекта на уровне корневой шейки (как в полости рта) и контакт с пассивным (вспомогательным) электродом через ионный проводник. В качестве последнего использовали прямоугольный брусок нейтрального мыла. При определенной влажности мыла обеспечивались, как плотное прилегание вспомогательного электрода, так и прочное крепление исследуемого образца зуба с надетой на него коронкой.

При лабораторных опытах для проведения поляризации импедансометрии использовали электрохимический комплекс IPC-Pro – FRA (Россия) [14, 15]. Прибор коммутировали по двухэлектродной схеме: рабочий электрод контактировал с временной коронкой, а вспомогательный вместе с электродом сравнения с “пассивным электродом”. Использовали электроды из титана ВТ1-0, что обусловлено его высокой химической инертностью в условиях эксперимента при любой полярности подводимого тока. Исследуемыми компонентами препарата “БВ” насыщали ватный тампон, помещенный в полость временной коронки.

При моделировании процесса ионо-электрофореза электрохимический комплекс работал в режиме гальваностата. Для исследования импеданса системы применялся потенциостатический режим. Частотную зависимость импеданса снимали в диапазоне от 10 кГц до 10 Гц при наложении гармонического сигнала 100 мВ.

Таблица 1. Номиналы элементов импеданса измерительной ячейки

	R_0 , Ом	R_1 , Ом	C_1 , мкФ	Погрешность модели
Без зуба (холостая проба)	170	275956	3.90	2.75%
Зуб 1	123	79554	0.0111	10.39%
Зуб 1+	125	64614	0.0113	8.18%
Зуб 2	359	63624	0.0119	6.57%

Для исследования глубины минерализации растворами препарата “БВ” готовили поперечные шлифы зубов. Для этого зубы разрезали вдоль алмазным диском и фиксировали половинки в протакриловой самотвердеющей пластмассе плоскостью разреза вверх. Подготовку шлифов к микроскопическим исследованиям проводили с помощью механической обработки абразивными кругами в несколько переходов и ручного полирования с применением тонкой алмазной пасты. Исследования поверхности поперечных шлифов проводили на оптическом микроскопе Neophot 2 (Германия) при увеличении $\times 30$ и на сканирующем электронном микроскопе САМЕВАХ (Франция). В отличие от оптической микроскопии при использовании РСЭМ обеспечивается значительно более высокое пространственное разрешение объекта и возможность получить информацию о локальном химическом составе участка фокусировки электронного луча или по трассе его сканирования с глубины порядка одного микрона. Поскольку исследуемые образцы не обладали металлической проводимостью, проводили поверхностное напыление молибденом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Импедансометрия

В предварительных экспериментах сравнивали частотные зависимости импеданса, полученные на электрохимической ячейке с закрепленным образцом зуба и без него, когда рабочий титановый электрод контактировал непосредственно с мылом. В обоих случаях годографы представляют собой фрагменты полуокружностей и соответствуют эквивалентной схеме вида $R_0(C_1/R_1)$, где R_0 моделирует омическое сопротивление электролита (мыла), C_1 – характеристика емкости данной системы электродов, R_1 – сопротивление саморазряда емкости. Расчеты, выполненные по специально разработанной программой DCS¹ [14] позволили определить номиналы этих элементов табл. 1.

Из результатов видно, что сопротивление “мыла-электролита” R_0 несколько меняется от измерения к измерению, поскольку зависит от условий контакта электродов с электропроводной средой, но отличается в этой серии не более, чем вдвое. И не видно существенной разницы между “холостой пробой” и измерениями с зубами. Напротив, сопротивление саморазряда R_1 в “холостой пробе” оказалось в 5 раз выше, чем в опытах с образцами зубов. Еще более сильное различие наблюдается для межэлектродной емкости – почти в 400 раз! Можно заключить, что “холостая проба” обладает преимущественно реактивным сопротивлением, обусловленным относительно высокой емкостью (3.9 мкФ) и малой утечкой (276 кОм). Включение в межэлектродную цепь образцов зуба радикально изменяет ситуацию: емкость системы снижается до 0.01 мкФ и одновременно ухудшаются изолирующие свойства межэлектродного пространства (сопротивление утечки R_2 снижается до 32–40 кОм). Годографы таких систем принимают вид правильных полуокружностей.

Резкое снижение емкости по сравнению с “холостой пробой” вызвано повышением расстояния между электродами системы и изменением диэлектрических характеристик ячейки из-за включения в ее межэлектродное пространство зуба. На вариации емкости могут сильно влиять и взаимоположение электродов (также как и размер и форма зуба) и это препятствует использованию этого параметра в качестве критерия эффективности обработки.

При анализе характера изменения R_2 следует принять, что собственное электросопротивление твердых тканей зуба достаточно высоко, и ток в основном проходит через систему капилляров дентинных канальцев, наполненных жидкостью. Поэтому, возрастание номинала R_2 может служить критерием эффективности блокировки дентинных канальцев осадком наносимого брушита.

Для объективного сравнения эффективности реминерализующего действия препарата “БВ” в зависимости от способа его применения мы рассчитали номиналы эквивалентной схемы для частотных зависимостей импеданса, полученных на образцах зубов, предварительно обточенных под коронки, при нанесении препарата аппликаци-

¹ Dummy Circuits Solver © Программа разработана В.Э. Касаткиным.

Таблица 2. Расчетные номиналы эквивалентной схемы для образцов зубов, обработанных *in vivo* реминерализующим препаратом “БВ”

Условия измерения	Зуб № 1 химическое нанесение			Зуб № 2 нанесение электрофорезом		
	R1, кОм	R1 _{ср} , кОм	C1, мкФ	R1, кОм	R1 _{ср} , кОм	C1, мкФ
Исходное состояние	87.36	77.45 ± 15	0.0104	26.51	29.25 ± 2.8	0.0144
	57.40		0.0144	32.00		0.0113
После обработки Препаратом “БВ”	67.45	66.01 ± 1.5	0.0144	60.42	54.41 ± 5.4	0.0133
	64.57		0.0159	49.70		0.0109

онным способом (зуб № 1) и с использованием электрофореза (зуб № 2).

При аппликационном нанесении компоненты препарата (растворы № 1 и 2) наносили на поверхность зуба последовательно с выдержкой по 10 мин для обеспечения пропитки и взаимодействия. В случае использования электрофореза время обработки каждым раствором также составило 10 мин при токе 5 мкА. При этом для раствора № 1 (нитрат кальция) применяли анодную полярность рабочего электрода, а для раствора № 2 (гидрофосфат аммония) – катодную, чтобы обеспечить электромиграцию, соответственно, катионов Ca²⁺ и анионов HPO₄²⁻ вглубь пористой структуры дентина. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 2.

Из полученных данных видно, что при химическом нанесении реминерализующего препарата сопротивление изменяется незначительно. Наблюдается даже некоторое его снижение (на 15%), хотя оно оказалось в пределах разброса исходного значения. При этом величина разброса измерений после химической обработки существенно снижается. После нанесения компонентов препарата в режиме электрофореза сопротивление возросло почти вдвое и разброс значений усилился пропорционально.

Вероятно, эти результаты можно объяснить тем, что при химическом нанесении слой осадка брушита формируется, вероятно, лишь на поверхности и эффективной блокировки каналов не достигается, а насыщающие поры ионы ammo-

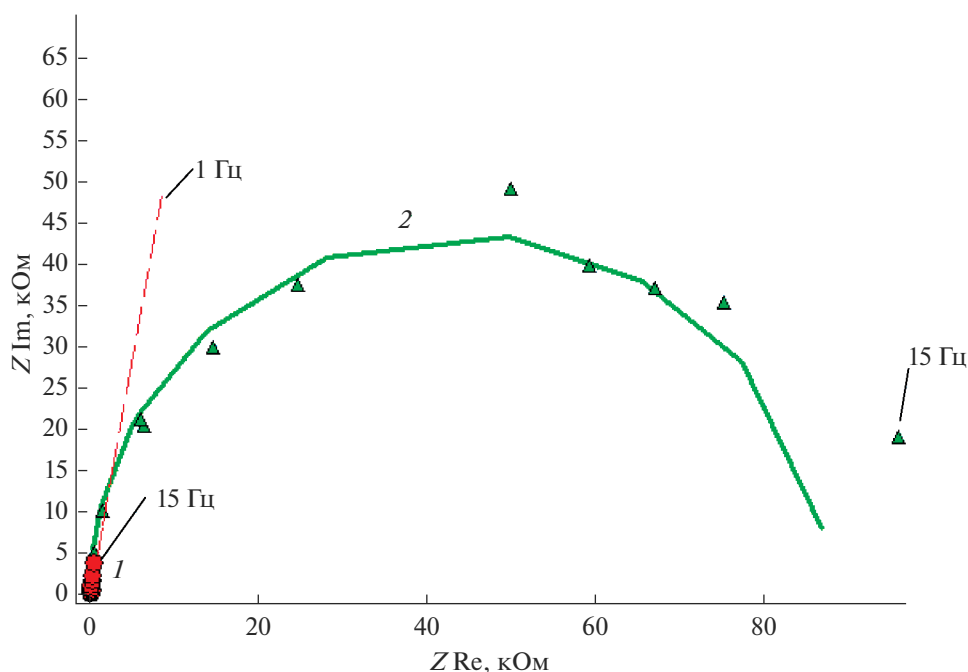


Рис. 1. Годографы импеданса измерительной ячейки в частотном диапазоне 10 кГц–15 гГц : 1 – без образца; 2 – с образцом зуба в исходном состоянии. Сплошная линия – результат расчета по эквивалентной схеме в указанном частотном диапазоне. Пунктир – расчет по эквивалентной схеме для холостой пробы в диапазоне 10 кГц–1 Гц.

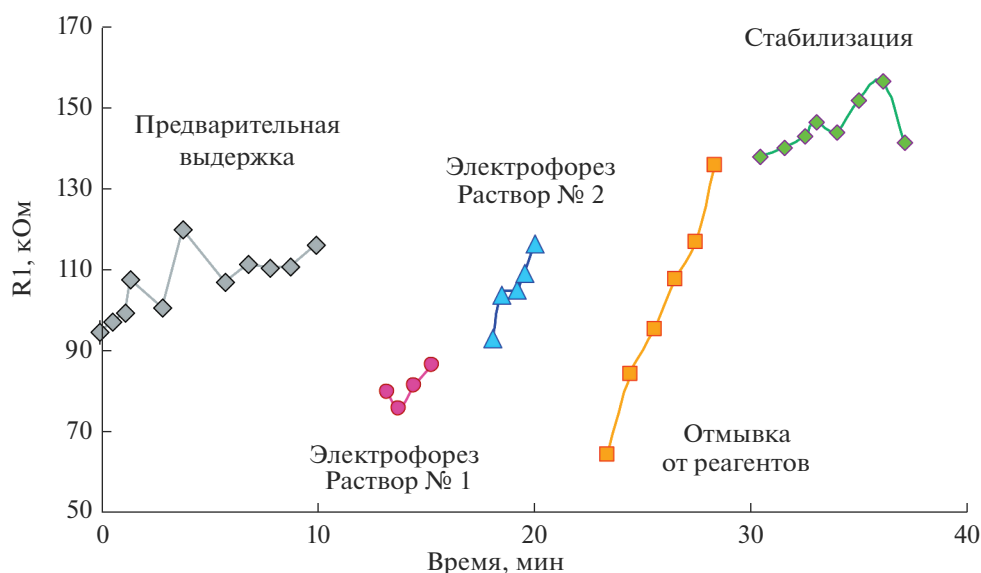


Рис. 2. Кинетика изменения сопротивления образца в ходе выполнения электрофореза (5 мкА). В интервалах между отдельными секциями графика происходила замена растворов.

ния и нитрата повышают электропроводность внутридентинного электролита.

При электро- ионофорезе с учетом полярности тока для каждого компонента препарата стимулируется проникновение активных веществ вглубь пор и брушит более эффективно блокирует каналцы и одновременно создаются затруднения проникновению вглубь иона NH_4^+ и NO_3^- .

Для оптимизации продолжительности электрофореза зуба препаратом “БВ” выполнена серия измерений на образцах удаленных однокорневых зубов с предварительно удаленной эмалью. Приборный комплекс IPC-FRA позволяет проводить измерения на определенной частоте (в данном случае 1 кГц) и вести непрерывную запись результатов не в виде компонентов вектора импеданса, а как номиналы выбранной схемы замещения. Этот режим был использован для отслеживания изменения номинала сопротивления в ходе всего эксперимента, включая и стадии электрофореза. Пример такой временной зависимости номинала сопротивления R_1 для параллельной схемы замещения (при $R_0 = 170 \text{ Ом}$) показан на рис. 2.

Во время предварительной выдержки в минеральной воде (секция 1) сопротивление возрастает с 75 до 120 кОм, вероятно за счет отмывки. Затем в ходе электрофореза раствором № 1 резко снижается (секция 2), поскольку его электропроводность существенно выше, чем для воды. Секция 3 относится к стадии электрофореза раствором № 2. Видно, что происходит заметное увеличение, как номинала сопротивления, так и скорости его изменения в ходе электрофореза.

Это свидетельствует о том, что несмотря на понижающее сопротивление поступление в систему ионов аммония, превалирует увеличивающий сопротивление процесс блокировки каналцев формирующимся в них осадком брушита.

Во время секции 4 электрофорез был выключен и проводили отмывку обработанного зуба (минеральной водой). Сопротивление сначала снизилось, вероятно, из-за влияния накопленных в системе ионов аммония и нитрата (которые во время электрофореза “сдерживали”), но по мере отмывки сопротивление все более повышалось (до 140 кОм) и на финальной стадии (секция 5) стабилизировалось на уровне 150–160 кОм, т.е. на 30% выше, чем до обработки.

О влиянии длительности стадий электрофореза можно судить из данных табл. 3.

Из табл. 3 видно, что в исходном состоянии зубы имели относительно высокое сопротивление. Отметим, что образец, подвергнутый электрофорезу в течение 2 мин, имел более высокое сопротивление за счет меньшего поперечного сечения зуба по сравнению с образцом зуба использованного для 5-ти минутной обработки. После суточной выдержки в минеральной воде сопротивление образцов снизилось соответственно в 2 и 3.5 раз, и эти величины были стабильны в течение 10 мин до начала электрофореза. По окончании электрофореза препаратом “БВ” во всех опытах сопротивление выросло, однако темп прироста снижался с ростом продолжительности воздействия, хотя абсолютная эффективность блокировки каналцев увеличивалась.

Таблица 3. Влияние продолжительности электрофореза на абсолютное и относительное изменение сопротивления зуба

Длительность стадий электрофореза, мин	Начальное R1, кОм	После замачивания 24 час R1 _{исх} , кОм	После электрофореза R1 _{фин} , кОм	Прирост сопротивления, ΔR, %
2	196 ± 14	107 ± 7.8	142 ± 10	35.5
5	130 ± 8.6	54 ± 7.1	94.5 ± 37	74.1
10	—	29 ± 2.8	54.4 ± 5.4	86.2

Таким образом, на основании данных результатов было выбрано оптимальное и достаточное для эффективной обработки препаратом “БВ” продолжительность электрофореза 2 × 2 мин вместо “штатной” 2 × 10 мин при химическом методе нанесения.

Сканирующая микроскопия

Импедасометрические исследования подтвердили эффективность блокирующего действия при реминерализующей обработке дентина препаратом “БВ”, причем она выше с использованием электрофореза компонентов препарата. Однако, эти исследования не дают информации о структуре и локальном распределении наносимого осадка по поверхности и глубине обрабатываемого зуба. Изучение поверхности и поперечных шлифов с помощью оптического микроскопа не выявило видимых изменений в результате реминерализующих обработок, вероятно из-за мало контрастного (белого) цвета тонких слоев брушита на фоне тканей зуба.

Сканирующая растровая электронная микроскопия обладает высоким пространственным разрешением по сравнению с оптическим микроскопом и позволяет для выбранных локальных участков получить данные о содержании отдельных элементов. На рис. 3 сопоставлены изображения приблизительно одного и того же участка поперечного шлифа зуба, без предварительной обработки, полученные на электронном и оптическом микроскопах. Темные участки слева относятся к армирующей смоле, в которую был залит образец. Вертикальная граница разделяет различные ткани зуба: эмаль (светлая на оптическом микроскопе) и дентин. В точках А и В выполнен анализ поверхностного слоя шлифа на глубину около 1 мкм. На полученных спектрах видны пики, относящиеся к отдельным элементам, по амплитуде которых, можно качественно судить о концентрации элемента в поверхностном слое. Основные пики на спектрах соответствуют углероду, кислороду, кальцию, фосфору и молибдену². Для количественного определения элементного

² В результате металлизации.

состава необходимо иметь набор эталонных образцов. Однако можно оценить относительное изменение состава по определенным элементам, рассчитав отношение сигналов этих элементов.

Основным минералом твердых тканей зуба является гидроксиапатит, который состоит из фосфата кальция, поэтому исследовали отношение интенсивностей сигналов спектра Са/Р. В твердых тканях зуба это соотношение различное. Проследив изменения состава в зависимости от обработки, можно оценить обогащение или обеднение состава тканей по этим элементам. Для необработанного зуба соотношение кальция к фосфору в точке А (эмаль) составляет 1.449, в точке В (дентин) – 1.283. Для образца фосфата кальция это стехиометрическое соотношение 1.5. Таким образом, видно, что эмаль обогащена кальцием по сравнению с дентином.

Были исследованы различные режимы нанесения реминерализующего состава “БВ” на поперечных шлифах образцов зубов, обработанных *in vitro* (табл. 3). На этих шлифах проводили измерение сигналов спектра по кальцию и фосфору вдоль линии от поверхности вглубь образца. Для участков, отвечающих эмали, дентину и рыхлому слою осадка брушита³, определяли усредненный сигнал по каждому компоненту и рассчитывали их отношение. Эти результаты приведены в табл. 4, а РСЭМ изображения на рис. 4.

Применение препарата “БВ” методом аппликации (пропитки) приводит к образованию на поверхности обточенной эмали участков, рыхлого осадка брушита (рис. 4б). Этот слой толщиной от 100 до 200 мкм плохо сцеплен с поверхностью зуба. Отношение усредненного сигнала Са/Р для этого участка вместе с эмалью составляет 1.127, а для дентина Са/Р = 1.198. Поскольку, для брушита теоретическое отношение Са/Р = 1, внешний слой весьма близок к ожидаемому. На границе с дентином наблюдается “провал” в уровне сигналов, что объясняется неплотным сцеплением осадка с основой и его отслоением.

Для образца II № 1 с обточенной эмалью, также приготовленного методом аппликации, в зону

³ На поверхности образца I.

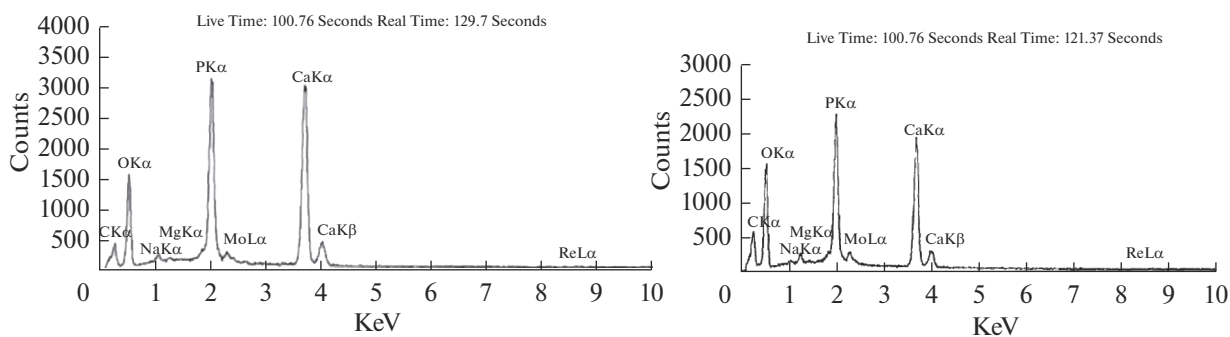
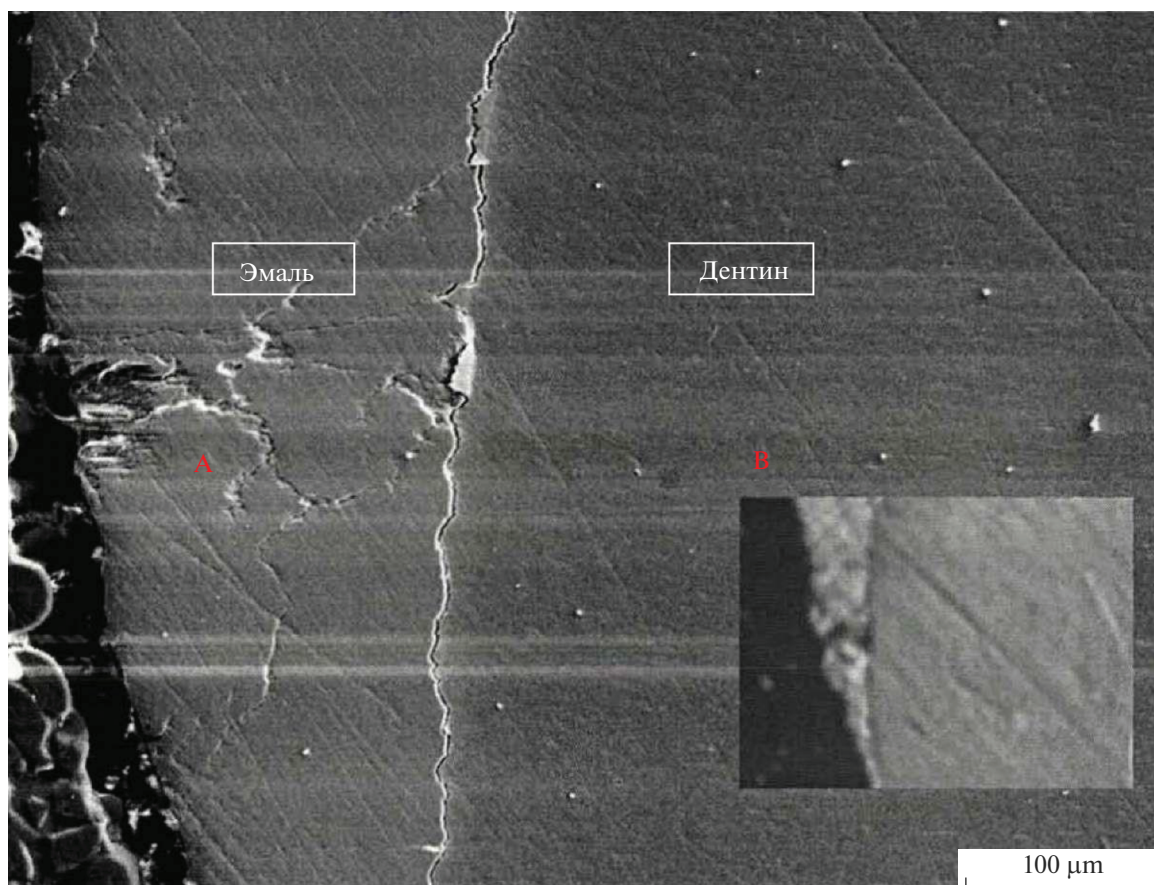


Рис 3. РСЭМ изображение поперечного шлифа зуба без обработки. На врезке тот же участок на оптическом микроскопе. В точках А и В получены спектры.

Таблица 4

Образец	Режим обработки <i>in vitro</i>	Относительный сигнал Ca/P		
		слой брушита	эмаль	дентин
0	Без обработки	wd	1.449	1.283
I № 3	Аппликация 5 раз 2 × 3 мин	1.127	—	1.198
II № 1	Аппликация 7 раз 2 × 10 мин			1.272
III № 2	Электрофорез 5 мкА 2 × 10 мин с учетом полярности по компонентам		1.430	1.348; 1.319
IV № 4	Электрофорез 5 мкА 2 × 5 мин с учетом полярности по компонентам		1.432	1.394; 1.391
V № 5	Электрофорез 5 мкА 2 × 2 мин с учетом полярности по компонентам			1.360

Таблица 5. Гиперестезия зубов в опытной (после проведения электрофореза) и контрольной группах

Группы пациентов	Всего пациентов	Отсутствие гиперестезии через 4–5 дней	Сохранение гиперестезии через 4–5 дней	Сохранение гиперестезии через 8–10 дней	Сохранение гиперестезии через 1 месяц
Опытная группа (после электрофореза)	42 пациента (68 зубов)	36 пациентов (85.7%) 56 зубов (82.4%)	6 пациентов (14.3%) 12 зубов (17.6%)	—	—
Контрольная группа	20 пациентов (45 зубов)	5 пациентов (25%) 15 зубов (33.3%)	15 пациентов (75%) 30 зубов (66.6%)	10 пациентов (5%) 25 зубов (55.5%)	У 2-х пациентов 3 зуба (6.60%) депульпировано

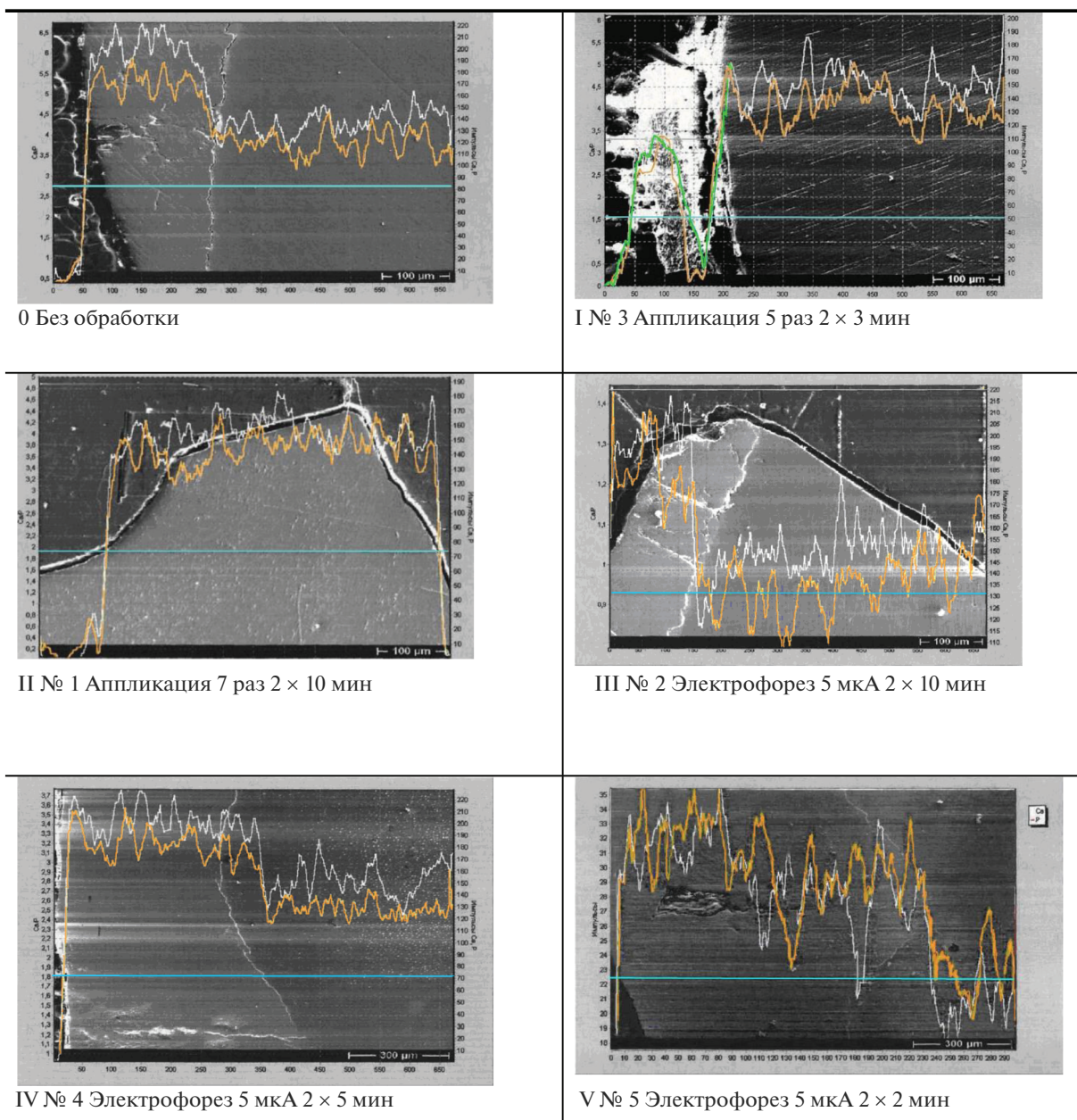


Рис. 4. РСМЭ изображения поперечных шлифов образцов зубов с различной методикой реминерализующей обработки и профили сигналов Са (белый (зеленый в малококонтрастной области осадка брусшита)) и Р (оранжевый) по линии сканирования (голубая) от поверхности (слева) вглубь образца (направо).

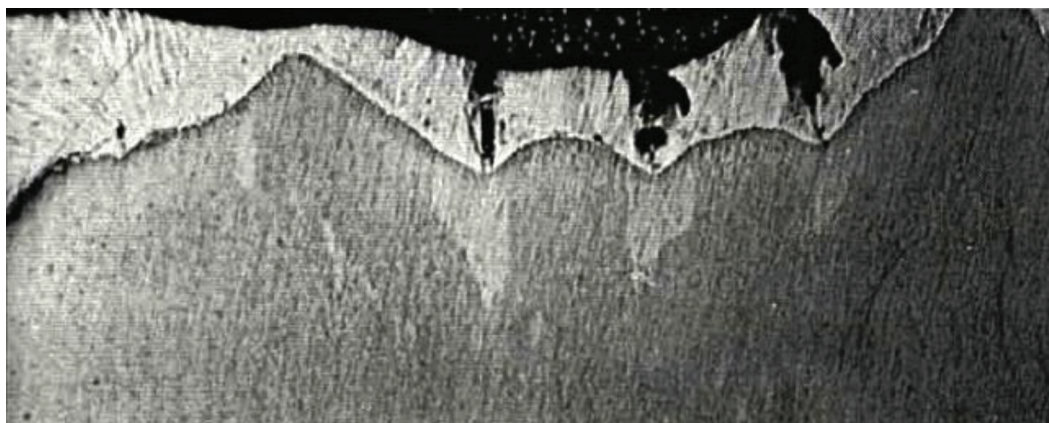


Рис. 5. Микрофото поперечного шлифа зуба с повреждениями эмали и участками реминерализации дентина после электрофореза.

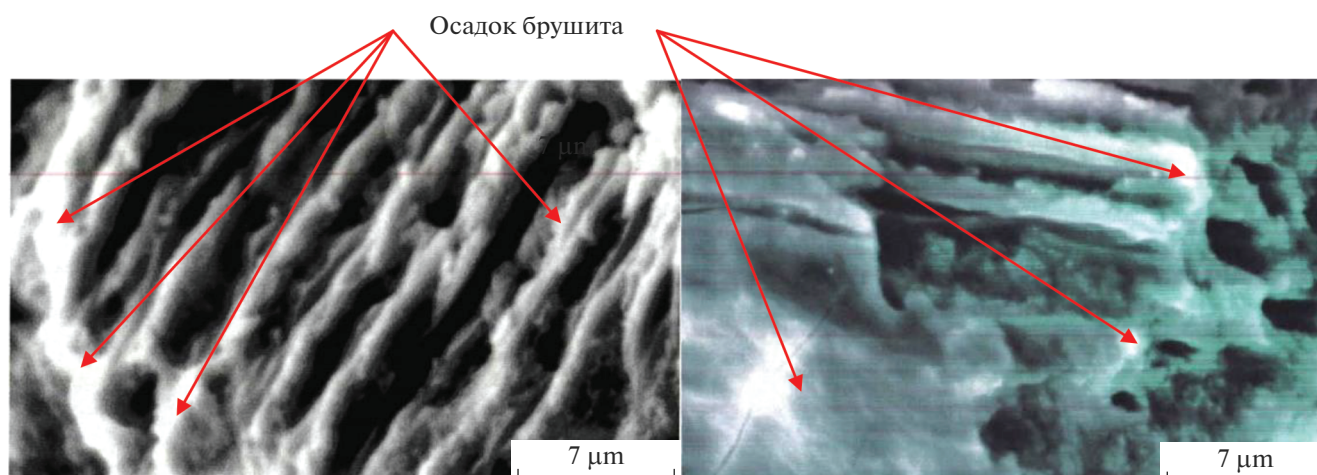


Рис. 6. РСМЭ изображение хрупких изломов зуба с осадком брушита на стенках и устьях дентинных каналов.

шлифа не попали участки с рыхлым слоем брушита, видны его отдельные фрагменты. По результатам для слоя дентина, видно, что отношение $\text{Ca/P} = 1.272$ и практически не отличается от отношения, как для предыдущего, так и необработанного образца. Характер распределения сигналов по линии сканирования не выявляет каких-либо областей измененной минерализации, что свидетельствует об однородном составе дентина без видимого обогащения поверхности. Другими словами, метод аппликации не обеспечивает изменения минерализации дентина даже при длительной и многократной пропитке.

Образец III № 2 обработан по методике электрофореза препаратом "БВ". На фото 4г виден слой эмали со сквозными микротрещинами. На его внешней поверхности нет следов осадка брушита, как при обработке аппликацией. Для участка эмали отношение $\text{Ca/P} = 1.430$, т.е. как для исходного состояния. Напротив, во внешнем

слое дентина зафиксировано заметно более высокое относительное содержание кальция по сравнению с необработанным образцом и образцами после аппликаций препарата "БВ" (в среднем на 6.6%), а в более глубоком слое отношение элементов близко к необработанному образцу.

Таким образом, при электрофорезе реакция между компонентами препарата "БВ" происходит не на поверхности твердых тканей, а преимущественно в глубоких слоях пористой структуры дентина. Минерализация насыщенной кальцием эмали не меняется, а внешний слой дентина обогащается этим элементом. Этот эффект сохраняется и при сокращении времени электрофореза (образцы IV № 4 и IV № 5), и реминерализация заметна в поверхностном слое толщиной по крайней мере в 300 мкм.

На рис. 5а показан поперечный шлиф образца зуба с сохранившейся эмалью, в которой были сквозные дефекты, возникшие при обточке. В ре-

зультате обработки электрофорезом произошла преимущественная реминерализация в слое дентина, прилегающего к этим повреждениям эмали, что видно, как более светлые участки на фото с оптического микроскопа.

На хрупком изломе образца IV № 4 видны дентинные каналы, просвет которых блокируется осадком бршишта (светлые отложения), сформированном в глубине слоя дентина под действием электрофореза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение электрофореза, как метода реминерализации дентина препаратом “БВ”, обеспечивает преимущество перед аппликационным методом, как по повышению электрического сопротивления (снижению пористости), так и по глубине воздействия на слой дентина. Сравнительные испытания этих методов в клинических условиях полностью подтвердили результаты лабораторных физико-химических исследований *in vitro*.

Пациентам опытной группы (42 человек//68 зубов) и контрольной группы (20 человек//45 зубов) проводили препарирование витальных зубов для изготовления ортопедических конструкций⁴. После препарирования в опытной группе на зубы с витальной пульпой воздействовали электрофорезом в течение 2 мин каждым раствором материала “БВ”, с использованием новой методики [13] На период изготовления металлокерамических протезов опорные зубы в опытной и контрольной группах покрывали временными коронками из композита и фиксировали на временный цемент “Темп-Бонд”.

Из табл. 4 очевидно преимущество и эффективность разработанного метода реминерализации с применением электрофореза. Этот метод не только более эффективен и обеспечивает более долговременный эффект снижения гиперстезии, но и требует значительно меньшего времени для обработки (2 × 2 мин) в отличие от аппликационного (2 × 10 мин). Пациенты, которым проводилась защита витальных зубов методом электрофореза с помощью материала “БВ”, не предъявляли жалоб на температурные, тактильные и химические раздражители. При осмотре рентгеновских снимков патологических изменений па-

родонта опорных зубов с витальной пульпой не обнаружили.

Таким образом, сочетание лабораторных *in vitro* и клинических *in vivo* методов исследования процессов реминерализации дентина позволило установить механизмы процессов и сократить время разработки эффективной методики снижения гиперчувствительности витальных зубов [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mehta D., Venkata S.* Clinical trial of tooth desensitization prior to in-office bleaching // Pubmed, 2013. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/eos.12067/abstract> (дата обращения 20.09.2015).
2. *West N.X.* // *Periodontol.* 2008. V. 2000. № 48. P. 31–41.
3. *Trowbridge H.O., Silver D.R.* // *Source Dent. Clin. North. Am.* 1990. V. 34. № 3. P. 561.
4. *Bipin Kumar Yadav, Anurag Jain, Ambesh Rai, Meetu Jain* // *J. International Oral Health.* 2015. V. 7(10). P. 137–143.
5. *Tal M., Oron M., Gedalia I., Ehrlich J.* // *Arch Oral Biol.* 1976. V. 21(5). P. 285–290.
6. *Levin M.P., Yearwood L.L., Corpenner W.N.* // *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.* 1973. V. 35. P. 741–746.
7. *Беленова И.А., Сущенко А.В., Кудрявцев О.А., Коренская И.В., Рожкова Е.Н.* // Профилактика осложнений после профессионального осветления зубов. 2018.
8. *Hiatt W.H., Johansen E.* // *J. Periodontol.* 1972. V. 43(6). P. 373–380.
9. *Вишнякова М.А.* Гиперестезия зубов и способы ее коррекции в клинической практике // *PROTECO.* 2018.
10. *Самарина Я.П.* Повышенная чувствительность зубов // *Научное обозрение.* 2017. № 4. С. 88–91.
11. *Боровский Е.В., Волков Е.А.* Материал для обработки очагов деминерализации твердых тканей зубов. Рег. удостоверение № 29/13111201/6011-03.
12. *Аджиева А.К., Аджиев К.С., Макеева И.М. и др.* Патент на полезную модель “Устройство для проведения электрофореза твердых тканей” // Номер патента: RU 58041 U1. Год публикации: 2006. Номер заявки: 2006118037/22 Дата регистрации: 25.05.2006. Дата публикации: 10.11.2006.
13. *Аджиева А.К., Тер-Асатуров Г.П., Абакаров С.И., Абакарова Д.С.* “Способ защиты препарированного зуба с витальной пульпой”. Патент на изобретение №2236828 А 61 СЮ/06. Заявка 06 июня 2003 г.
14. *Щербаков А.И., Коростелева И.Г., Касаткина И.В., Касаткин В.Э. и др.* // *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2019. Т. 55. № 4. С. 396–401.
15. *Щербаков А.И., Коростелева И.Г., Касаткина И.В., Касаткин В.Э. и др.* // *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2020. Т. 56. № 2. С. 158–164.
16. *Гажва С.И., Касумов С.А., Шурова Н.Н.* // *Современные проблемы науки и образования.* 2017. № 4. С. 2017. Т. 19. № 11. С. 222–229.

⁴ Как в опытной группе, так и в контрольной группах одонтопрепарирование проводили под инфльтрационным или проводниковым обезболиванием. Витальные зубы препарировали с учетом зон безопасности и соблюдением всех общепринятых мер предосторожности шлифования твердых тканей зубов.