

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.373:616.314-08

**МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕМИНЕРАЛИЗИРУЮЩЕЙ
ТЕРАПИИ ЗУБНОЙ ЭМАЛИ**

2026 г. А. Э. Постельга*, В. О. Шароватов, О. Д. Гейт**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет

им. Н.Г. Чернышевского

Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

**E-mail: Apostelga@xmail.com*

***E-mail: olesyagate@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.06.2025

После доработки 30.03.2026

Принята к публикации 04.05.2026

Представлен метод оценки качества зубной эмали с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме. Предлагаемый метод позволяет провести сравнительный анализ состояния зубной эмали до и после процедуры и помочь врачу стоматологу принять решение об ее эффективности. Экспериментальная установка на базе СВЧ-автодина с диодом Ганна обеспечивает высокую точность измерений и пространственное разрешение. Полученные результаты показывают различие эффективности реминерализации в разных участках зуба, особенно в пришеечной области, где обработка осложнена анатомическими особенностями. Преимуществом данного метода является то, что он может использоваться как в контактном, так и в бесконтактном режиме, при этом применение в контактном режиме не оказывает разрушающего воздействия на образец. Этот подход обладает потенциалом для широкого применения в стоматологии и научных исследованиях, что позволяет стоматологам и ученым проводить точный контроль состояния зубной эмали и изучать воздействие на нее реминерализующих веществ.

Ключевые слова: ближнеполевой СВЧ-микроскоп, зубная эмаль, реминерализация, диэлектрическая проницаемость

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-интерферометры применяются в промышленности и медицине для контроля параметров движущихся объектов и для измерений параметров материалов [1, 2].

Одним из представителей СВЧ-интерферометров является СВЧ-автодин на диоде Ганна. Он применяется для контроля структур микро- и нанoeлектроники [3, 4], для регистрации параметров вибраций [5, 6], а также для контроля физиологических параметров, таких как дыхание и сердцебиение [7, 8].

Одним из возможных способов использования СВЧ-автодина является контроль качества зубной эмали в процессе реминерализующей терапии, в ходе которой изменяются толщина и структура эмали, а следовательно, и ее диэлектрическая проницаемость. Чувствительность установки к таким изменениям возникает из-за взаимодействия ближнеполевого электромагнитного излучения с диэлектрическими свойствами материала. Толщина эмали зуба варьируется в зависимости от типа зуба и его участка: для резцов она составляет 0.5–1.0 мм на режущем крае и уменьшается до 0.01 мм в шейке; для премоляров и моляров – до 1.5–2.5 мм на жевательной поверхности. В исследовании [9] с применением открытого коаксиального датчика в частотном диапазоне 0.5–18 ГГц установлено, что относительная диэлектрическая проницаемость эмали колеблется в пределах 10.0–11.0 в области коронки зуба, а относительная диэлектрическая проницаемость дентина варьируется от 9.5 до 8.0 в корневой части. Авторы данного исследования подтвердили, что диэлектрические характеристики эмали и дентина изменяются в зависимости от частотных параметров и методики измерения, а также от качества контакта между измерительным датчиком и зубной поверхностью. Эти значения определяют степень отражения и поглощения СВЧ-волны. Однако одновременное измерение толщины и диэлектрической проницаемости представляет собой проблему неразрушающего контроля, поскольку существуют различные сочетания значений выбранных параметров, при которых наблюдается одинаковая частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ-излучения [10].

Для контроля качества зубной эмали применяется ближнеполевой СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме.

Ключевым элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа является зонд с размером апертуры намного меньше длины волны СВЧ-излучения. В ближнеполевых СВЧ-микроскопах в качестве зондирующего используется поле нераспространяющегося типа волн [11]. Именно такое поле образуется, если центральный проводник коаксиальной линии выходит за пределы внешнего проводника. Достоинством использования нераспространяющегося типа волн является их затухание на малом расстоянии, что позволяет получить высокое пространственное разрешение.

При непосредственном подключении зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа к СВЧ-генератору без использования элементов развязки может быть создана автодинная система, в которой реализуется так называемый эффект автодинного детектирования. При этом активный элемент СВЧ-генератора является одновременно источником и приемником отраженной электромагнитной волны. Использование автодинных систем позволяет создать измерители, отличающиеся меньшими габаритами, массой,

потребляемой мощностью, высокой точностью измерений и простотой в эксплуатации [12].

2. ОСНОВЫ МЕТОДА

Эмаль является внешней оболочкой зуба и покрывает всю его поверхность.

В результате воздействия реминерализующего состава восстанавливается поверхностный участок эмали, однако не существует методов, позволяющих оценить качество зубной эмали после проведения процедуры.

Предлагаемый метод позволит провести сравнительный анализ качества зубной эмали до и после проведения процедуры реминерализации и помочь врачу стоматологу принять решение о ее эффективности.

Суть метода заключается в том, чтобы использовать сканирующий режим ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме. Однако в отличие от случая, рассматриваемого автором работы [13], не будет сниматься профиль зубной эмали целиком – вместо этого будет проводиться контроль отдельно взятых точек на поверхности эмали.

Предполагается, что эмаль зуба проявляет свойства диэлектрика, а изменение структуры эмали влияет на ее диэлектрическую проницаемость. Изменение диэлектрической проницаемости зубной эмали влияет на поведение электромагнитной волны при взаимодействии со структурой зубной эмали – это изменение поведения и будет детектировать ближнеполевым СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме.

Также стоит отметить, что при длительном воздействии на эмаль фторсодержащей пасты может наблюдаться утолщение зубной эмали. Ближнеполевым СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме, может детектировать изменение толщины образца, однако нет возможности определить отдельно толщину образца и его диэлектрическую проницаемость. Поэтому для контроля процедуры реминерализации введем такую величину, как качество зубной эмали. Эта величина будет характеризовать толщину зубной эмали и ее диэлектрическую проницаемость в совокупности.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Схема СВЧ-автодина представлена на рис. 2.

Рис. 1. Экспериментальная установка для контроля качества зубной эмали

Рис. 2. Схема СВЧ-автодина

Полупроводниковый автодин 1 (рис. 1) выполнен в виде СВЧ-генератора на основе короткозамкнутого отрезка волновода (сечение канала 10–23 мм²). В качестве активного элемента использовался диод Ганна 2 (рис. 2) типа 3A723, помещенный в зазор стержневого держателя. Частота диода Ганна составляет около 12 ГГц, выбор обусловлен удобством создания волноводной системы в трехсантиметровом диапазоне волн (длина волны равна примерно 2.5 см при частоте 12 ГГц). Данный диапазон является оптимальным для контроля биологических объектов и материалов с изменяющимися параметрами, поскольку он обеспечивает проникновение поля на глубину, соизмеримую с толщиной исследуемых слоев [13]. Кроме того, в трехсантиметровом диапазоне проще согласовывать узлы, чем в более коротковолновом восьмимиллиметровом диапазоне (с частотой выше примерно 35–40 ГГц). Последний, несмотря на более высокую чувствительность, характеризуется значительно большей сложностью подавления помех и согласования элементов. Выбранная частота обеспечивает баланс между высокой точностью измерений диэлектрических свойств (включая проницаемость) и минимизацией шумов. Мощность излучения составляет примерно 10 мВт, при этом плотность мощности на поверхности зонда не превышает 10 мкВт/см², что соответствует санитарно-техническим нормам (СанПиН 2.1.8./2.2.4.1383-03) для электромагнитных полей радиочастотного диапазона; предельно допустимая плотность потока энергии для населения составляет около 100 мкВт/см² при облучении в течение часа [14]. Частота и мощность СВЧ-генератора соответственно могли перестраиваться в результате перемещения поршня и изменения питающего напряжения на диоде Ганна 2 (рис. 2). Сигнал автодинного генератора контролировался с помощью детекторного диода 3 (рис. 2) типа 2A203, помещенного в зазор другого стержневого держателя и расположенного между диодом Ганна и короткозамыкающим поршнем 1 (рис. 2) на расстоянии одной длины волны диода Ганна и 1/4 длины волны короткозамыкающего поршня. Продетектированный сигнал через АЦП E14-140 3 (рис. 1) передавался в компьютер 4 (рис. 1) и обрабатывался с помощью специального программного обеспечения.

СВЧ-зонд 5 (рис. 1) выполнен в виде коаксиально-волнового перехода и прикрепленного к нему коаксиального кабеля. Свободный конец коаксиального кабеля представляет собой обрыв с выступающей на 1.5 мм центральной жилой, помещенной в корпус из пластика. Такая форма наконечника выбрана для обеспечения высокого пространственного разрешения за счет фокусировки ближнеполевого излучения, аналогично коаксиальным зондам с заостренной центральной жилой, где заострение позволяет повысить локальность взаимодействия поля с образцом и уменьшить влияние внешних факторов. Часть корпуса, изолирующая центральную жилу из коаксиального

кабеля, сделана из фторопласта и спроектирована таким образом, чтобы радиус сферы ближнего поля не превышал толщину зубной эмали, а величина потока энергии СВЧ-излучения не превышала 10 мВт/см^2 .

Зависимость ближнеполевого сигнала от расстояния от кончика зонда до зуба определяется экспоненциальным затуханием нераспространяющегося поля: сигнал уменьшается с ростом расстояния, поэтому в эксперименте оно фиксировано на уровне 0.5 мм за счет защитного диэлектрического слоя, предотвращающего повреждение эмали.

Наклон зонда влияет на эффективную площадь взаимодействия: при отклонении от перпендикулярного положения сигнал искажается из-за изменения проекции поля на поверхность. Зонд подносился к образцу строго перпендикулярно, но кривизна зуба и возможные колебания руки оператора могут вводить погрешность в сигнале, что минимизируется фиксацией зонда.

Конфигурация фрагмента измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, помещенной в корпус, получена путем моделирования в САПР HFSS. 3D-модели корпуса и конфигурации ближнего поля представлены на рис. 3, 4.

Рис. 3. 3D-модель фрагмента измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, помещенной в корпус, без изображения ближнего поля

Рис. 4. 3D-модель фрагмента измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, помещенной в корпус, с изображением ближнего поля

4. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗУБНОЙ ЭМАЛИ

Исследуемый образец помещается в ближнее поле измерительного зонда, созданное СВЧ-автодином. Измерение можно проводить как в контактном, так и в бесконтактном режимах, при этом применение в контактном режиме не оказывает разрушающего воздействия на образец, а переход между режимами не требует технических операций и/или высокой квалификации оператора, однако в течение одного конкретного измерения менять режим не рекомендуется. Фиксация образца зависит от конфигурации измерительного зонда и условий проведения эксперимента.

Часть излучения, отраженного от образца, возвращается в СВЧ-автодин через зонд и линию передачи. Сигнал от СВЧ-автодина детектируется, преобразуется в автодинный сигнал, оцифровывается и поступает на ЭВМ для обработки.

Измеренное значение на приборе сохраняется и проводится реминерализация зубной эмали. После проведения процедуры процесс измерения проводится повторно, а новый результат сравнивается с предыдущим. По разнице результатов измерения до и после процедуры реминерализации проводится оценка качества проведенной процедуры.

В связи с тем, что в ходе контроля эффективности процесса реминерализации зубной эмали используются относительные величины, калибровка установки не требуется, однако в ходе одного эксперимента не рекомендуется производить изменения в конфигурации прибора [15].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты контроля качества зубной эмали представлены на рис. 5.

Рис. 5. Результат проведения реминерализирующей терапии *in vivo*

Для удобства восприятия данных единицы измерения напряжения переводились в относительные единицы. Абсолютный результат до процедуры делился на абсолютное значение этого результата и принимался за единицу (синяя часть столбца 1 на рис. 5). Абсолютное значение после процедуры делилось на абсолютное значение результата до процедуры, после чего из полученного значения вычитался относительный результат до процедуры, т. е. единица. Модуль полученного результата накладывался на относительный результат до процедуры для сравнения (красная часть столбца 1 на рис. 5). По результатам измерений, представленным на рис. 5, можно оценить качество процедуры реминерализации в контрольных точках зуба. Например, на рис. 5 а и б можно увидеть, что воздействие реминерализирующего состава оказалось неравномерным и, возможно, потребуется повторная процедура. Также в точке 3 (шейка зуба) результат всегда ниже, чем в точке 2. Это объясняется тем, что шейка зуба граничит с десной, что усложняет тщательное нанесение реминерализирующего состава, поэтому контроль процедуры реминерализации на данном участке зуба особенно важен.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован метод контроля качества зубной эмали с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме.

2. Получена и представлена конфигурация ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме, пригодная для применения предложенного метода. Также описана процедура, которая позволит корректно провести контроль качества зубной эмали в медицинских условиях и получить достоверный результат.

3. Полученные результаты могут представлять ценность как для врачей-стоматологов, оказывающим медицинские услуги (для контроля качества), так и для исследователей, изучающим зубную эмаль и воздействие на нее реминерализирующих веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ветрова Ю.В., Дорошенко А.А., Постельга А.Э., Усанов Д.А.* Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине. 2017. С. 198. ISBN 978-5-91879-741-9.
2. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В.* Proc. 8 International Microwave Conf. MIKON-88, October 3–7, 1988. Gdansk (Poland), 1988. P. 412.
3. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др.* Изв. Вузов. Электроника. 2011. № 5 (91). С. 83. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16971794>
4. *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др.* Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2012. № 3 (514). С. 71. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23035591>
5. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э.* ПТЭ. 2004. № 5. С. 130. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17757073>
6. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Научные известия Сумгайтского государственного университета. 2002. Т. 2. № 1. С. 7.
7. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Постельга А.Э.* Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11–12. С. 44. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25456697>
8. *Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А.* Медицинская физика. 2013. № 4 (60). С. 72. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21367640>
9. *Berezhanska M., Godinho D. M., Maló P., Conceição R. C.* Sensors. 2023. V. 23. № 3. P. 1617. <https://doi.org/10.3390/s23031617>
10. *Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н. Ю.* Изв. Вузов. Электроника. 2011. № 4 (90). С. 71. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16548190>
11. *Kleismit R.A., Kazimierczuk M.K., Kozlowski G.* IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2006. V. 54. № 2. P. 639. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.862668>
12. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд. СГУ, 2003. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19581367>
13. *Усанов Д.А.* Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во СГУ, 2010. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25882997>
14. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03
15. *Постельга А.Э., Шароватов В.О., Калякина Н.А., Исаева А.А.* РФ Патент 2750273_С1, 2020.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальная установка для контроля качества зубной эмали: 1 – СВЧ-автодин, 2 – блок питания, 3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 4 – компьютер со специальным программным обеспечением, 5 – СВЧ-зонд в виде коаксиально-волнового перехода и прикрепленного к нему коаксиального кабеля
- Рис. 2.** Схема СВЧ-автодина: 1 – короткозамыкающий поршень, 2 – диод Ганна, 3 – СВЧ-диод, 4 – выход СВЧ-тракта, 5 – СВЧ-тракт (пространство волновода)
- Рис. 3.** 3D-модель фрагмента измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, помещенной в корпус, без изображения ближнего поля
- Рис. 4.** 3D-модель фрагмента измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, помещенной в корпус, с изображением ближнего поля
- Рис. 5.** Результат проведения реминерализующей терапии *in vivo* в относительных единицах. Ось x – контрольные точки зуба от шейки зуба до режущего края, ось y – показания с детектирующего диода СВЧ-автодина. Синие столбцы – результат до процедуры, красные столбцы – результат после процедуры

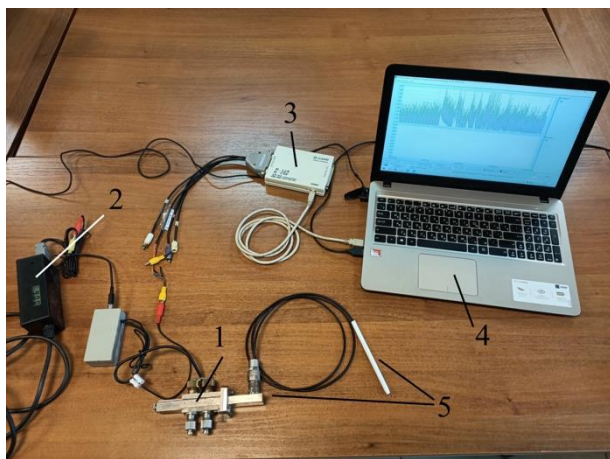


Рис. 1

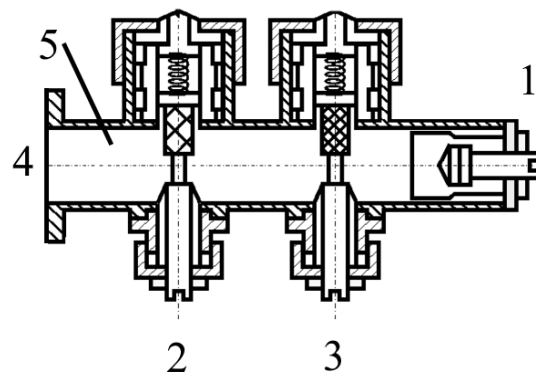


Рис. 2

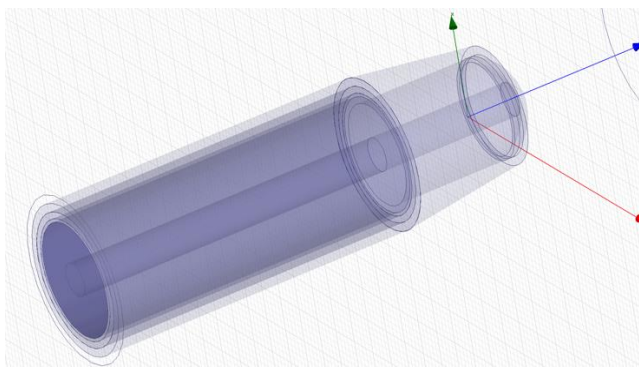


Рис. 3

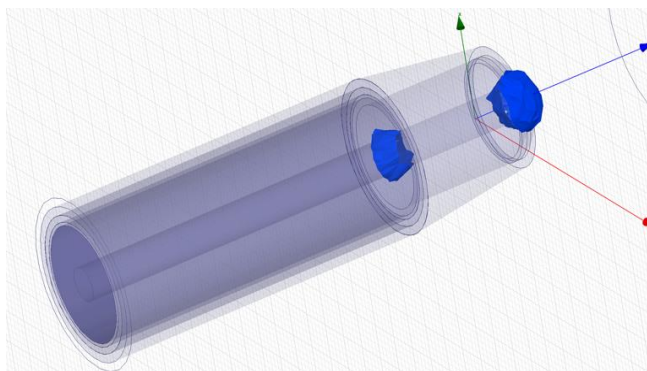
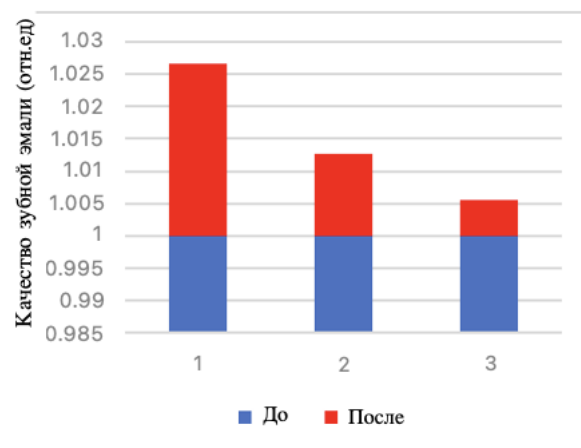
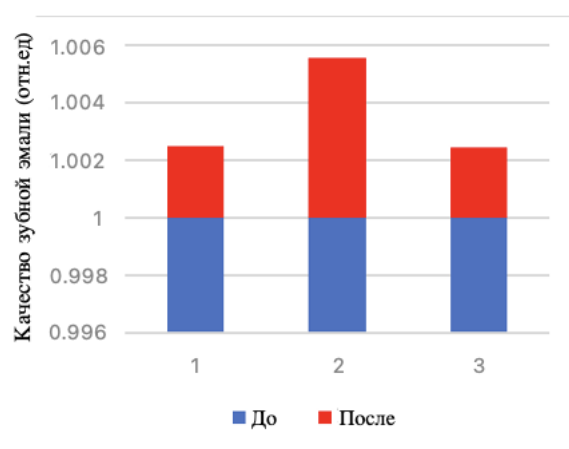


Рис. 4



(а)



(б)

Рис. 5