

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ КАРИОЗНОГО ПОРАЖЕНИЯ ЭМАЛИ ЗУБА С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**С.И. Володарская, К.И. Зайцев, В.Е. Карасик,
Е.В. Новицкая, И.Н. Фокина**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: siv@bmstu.ru; kirzay@gmail.com; karassik@bmstu.ru; fokina.irina@bk.ru;
novitskaya.katya@gmail.com

Рассмотрена возможность использования терагерцовой спектроскопии во временной области для ранней неинвазивной диагностики кариозного поражения эмали человеческого зуба. Проведены in vitro исследования образцов зубов человека с различным состоянием эмали (с различной степенью деминерализации). Состояние деминерализации зубной эмали имитировалось путем травления эмали образцов слабыми кислотами — 1 %-ной азотной и 6 %-ной уксусной. Зарегистрированы комплексные амплитудные спектральные коэффициенты отражения терагерцового излучения от образцов зубной эмали. Разработан метод восстановления профиля диэлектрической проницаемости исследуемой среды на основе комплексного амплитудного спектрального коэффициента отражения исследуемой среды. Восстановлены профили диэлектрической проницаемости образцов эмали с различным состоянием деминерализации. В результате экспериментальных исследований определена качественная взаимосвязь между терагерцовыми оптическими характеристиками эмали и концентрацией содержащихся в ней минеральных веществ, что свидетельствует о возможности создания нового метода ранней неинвазивной диагностики кариозного поражения зуба человека с помощью терагерцовой спектроскопии.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, диагностика деминерализации зубной эмали, диагностика кариозного поражения зуба, восстановление профиля диэлектрической проницаемости, обратная задача.

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF POSSIBILITY TO EARLY DETECT THE ENAMEL CARIES LESION USING TERAHERTZ SPECTROSCOPY

**S.I. Volodarskaya, K.I. Zaitsev, V.Ye. Karasik,
E.V. Novitskaya, I.N. Fokina**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: siv@bmstu.ru; kirzay@gmail.com; karassik@bmstu.ru; fokina.irina@bk.ru;
novitskaya.katya@gmail.com

The possibility of using terahertz spectroscopy in time domain for early noninvasive detection of caries lesion of the human tooth enamel is considered. The samples of human teeth with different enamel state (different degree of demineralization) are investigated in vitro. A state of the enamel demineralization was simulated by etching the samples with weak acids (the 1 % nitric acid and the 6 % acetic acid). The complex amplitude spectral factors of terahertz radiation reflection from the enamel samples are recorded. A method is developed for reconstruction of permittivity profile for the medium under study on the basis of the complex amplitude spectral reflection factor of the investigated medium. The permittivity profiles are reconstructed for the enamel samples with different degree of demineralization. As a result of experimental studies, the qualitative interconnection is determined between the terahertz optical

characteristics of enamel and the concentration of mineral substances contained in it, which is the evidence that the development of a novel method for early noninvasive diagnostics of caries lesion of human tooth using terahertz spectroscopy is possible.

Keywords: terahertz spectroscopy, diagnostics of enamel demineralization, diagnostics of tooth caries lesion, reconstruction of permittivity profile, inverse problem.

По статистике кариозным поражением зубов (разрушение твердых тканей зуба — эмали и дентина) страдает 99% населения планеты. Способ лечения кариеса зависит от стадии кариозного поражения. На ранней стадии развития кариеса (на стадии деминерализации эмали зуба [1], т.е. на стадии пятна) лечение заключается в насыщении эмали зуба ионами кальция и фтора с помощью реминерализующих гелей и паст [2]. На поздних стадиях кариозного поражения, когда дефекты твердых тканей зуба заметны визуально, требуется инвазивное лечение — механическая обработка кариозной полости с последующим пломбированием. Повреждение кариозным процессом значительной части зуба ведет к его разрушению и удалению.

Диагностика кариозного процесса на поздних стадиях, когда поражения тканей можно обнаружить невооруженным глазом, не вызывает никаких трудностей, в отличие от диагностики на стадии деминерализации эмали. Несмотря на то, что лечение кариеса на стадии пятна не предполагает удаление пораженных тканей, далеко не всегда кариес может быть обнаружен на стадии деминерализации, что связано в первую очередь с отсутствием эффективных аппаратных методов исследования состояния эмали.

Преимущества лечения кариеса на стадии деминерализации эмали очевидны. Во-первых, процедура реминерализации эмали с помощью гелей, Са- и F-содержащих препаратов экономически выгоднее, чем пломбирование или удаление зуба. Во-вторых, методы лечения деминерализации являются безболезненными и неинвазивными, а следовательно, отсутствует риск занесения инфекции. Ранняя диагностика кариеса и проведение соответствующего лечения позволят сохранить целостность зубов, что особенно важно в детском возрасте для формирования правильного прикуса и костей челюстно-лицевого скелета, а у взрослых — для сохранения жевательной функции и косметики.

Все существующие на данный момент аппаратные способы диагностики деминерализации либо не могут применяться *in vivo* (трансмиссионная микрорадиография [3]), либо предполагают использование вредного для организма человека ионизирующего излучения (микрофокусная компьютерная томография [4]). В связи с отмеченным, актуальна проблема создания новых безвредных и эффективных методов аппаратного исследования деминерализации эмали *in vivo*.

Перспективным методом ранней диагностики деминерализации эмали зуба может стать терагерцовая (ТГц) спектроскопия во времен-

ной области (terahertz time-domain spectroscopy [5]) благодаря уникальным свойствам ТГц излучения. Излучение ТГц диапазона занимает промежуточное положение между инфракрасной и микроволновой областями электромагнитного спектра (между 0,1 ТГц и 10,0 ТГц). Терагерцовым волнам присущи свойства как излучения миллиметрового диапазона (высокая проникающая способность, низкая ионизирующая способность), так и излучения ИК области спектра (способность взаимодействовать с вращательными и колебательными энергетическими уровнями молекул вещества). Терагерцовое излучение способно проникать достаточно глубоко в зубную ткань (на глубину до нескольких миллиметров).

Тот факт, что спектральные коэффициенты отражения ТГц излучения от здоровой зубной эмали и от эмали с пониженным содержанием минералов различаются, позволяет говорить о возможности создания новейших методов и систем диагностики деминерализации зубной эмали на основе ТГц спектроскопии.

Состояние деминерализации зубной эмали можно наиболее полно охарактеризовать профилем концентрации содержащихся в зубной эмали минеральных веществ (зависимостью концентрации минеральных веществ в эмали зуба от глубины), который, в свою очередь, связан с профилем диэлектрической проницаемости (зависимостью диэлектрической проницаемости зубной эмали от глубины). Последний может быть с высокой точностью восстановлен путем обработки сигналов ТГц спектрометра.

Проблема создания ТГц системы диагностики деминерализации эмали зуба на основе ТГц спектроскопии носит комплексный характер и предполагает разработку как ТГц спектроскопической системы, способной регистрировать спектральные характеристики исследуемого образца в труднодоступных местах, так и уникальных методов решения обратных задач ТГц спектроскопии, связанных с восстановлением профиля диэлектрической проницаемости среды.

Цель данной работы — обоснование возможности восстановления профиля диэлектрической проницаемости эмали зуба с помощью ТГц спектроскопии, а также анализ возможности диагностики состояния деминерализации эмали на основе результатов спектроскопических исследований.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка методики спектроскопических исследования образцов зубной эмали *in vitro* и методики имитации деминерализации эмали зуба на образцах *in vitro*;
- разработка метода решения обратной задачи, связанной с восстановлением профиля диэлектрической проницаемости эмали зуба на основе обработки сигналов ТГц спектрометра;

- исследование профилей диэлектрической проницаемости образцов эмали зуба с помощью предложенного метода решения обратной задачи;
- анализ полученных результатов.

Рассмотрим основные принципы ТГц спектроскопии во временной области.

Терагерцовая спектроскопия во временной области. Принцип действия ТГц спектроскопии во временной области предполагает зондирование исследуемого объекта коротким импульсом ТГц излучения длительностью в 1 пс и регистрацию отраженного или прошедшего через объект сигнала (временной зависимости напряженности электрического поля) с временным разрешением до 50 фс.

Поскольку ультракороткий импульс ТГц излучения содержит спектральные составляющие в широкой области частот от 0,1 до 3 ТГц, то существует возможность анализа спектральных характеристики исследуемого образца в данной частотной области [6]: амплитудных коэффициентов пропускания и отражения, диэлектрической проницаемости, удельного коэффициента поглощения излучения веществом.

На рис. 1 приведена принципиальная схема ТГц спектрометра. Генерация импульсного ТГц излучения в данной схеме осуществляется путем зондирования фотопроводящей антенны (ФПА) ультракороткими оптическими импульсами фемтосекундного волоконного лазера (ФСВЛ). Регистрация временной зависимости напряженности электрического поля ТГц импульсного излучения осуществляется в электрооптическом детекторе (ЭОД) на основе электрооптического кристалла ZnTe (ЭОК). Кратко опишем принцип работы ТГц спектрометра.

Источником ультракоротких оптических лазерных импульсов длительностью в 80 фс с частотой повторения в 50 МГц, служит волоконный лазер, в котором активной средой является легированное Yb стекло. Для накачки ФПА используется вторая гармоника оптического излучения лазера.

Импульс ФСВЛ падает на светоделитель (СД), расщепляется на две части: пучок накачки и пробный пучок, причем пучок накачки имеет большую интенсивность.

Ультракороткие импульсы пучка накачки попадают на диэлектрическую подложку ФПА, являющуюся дипольным источником ТГц импульсов. Каждый оптический импульс накачки участвует в генерации соответствующего ему импульса ТГц излучения. В дальнейшем ТГц импульсы проходят через измерительную кювету, пустую при измерении базового сигнала или содержащую исследуемый образец при измерении сигнала образца.

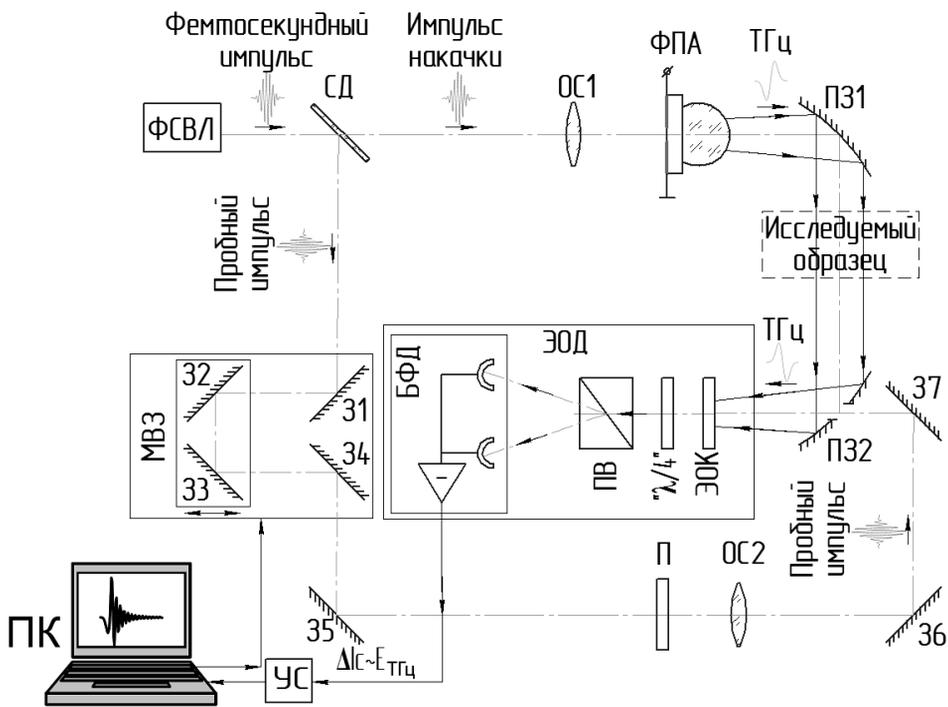


Рис. 1. Принципиальная схема ТГц спектрометра с временным разрешением с приставкой для работы в режиме “на пропускание”:

31-37 — плоские зеркала; ПЗ1, ПЗ2 — параболические зеркала; ОС1, ОС2 — оптические системы; $\lambda/4$ — четвертьволновая пластинка; УС — синхронный усилитель сигнала; ПК — портативный компьютер

Импульсы пробного пучка, пройдя механическую ветвь задержки (МВЗ) и поляризатор (П), одновременно с импульсами ТГц излучения попадают в ячейку Поக்கельса ЭОД, изготовленную на основе ЭОК ZnTe. Наведенное ТГц полем в кристалле двулучепреломление приводит к преобразованию линейной поляризации пробного оптического импульса в слабоэллиптическую.

Четвертьволновая пластинка ($\lambda/4$), стоящая за ЭОК, позволяет преобразовать слабоэллиптическую поляризацию в эллиптическую, близкую к циркулярной.

Призма Волластона (ПВ) служит для пространственного разделения двух ортогонально поляризованных составляющих оптического излучения, которые впоследствии детектируются балансной схемой фотодетекторов (БФД). Разность интенсивностей двух ортогонально поляризованных компонент оптического излучения пропорциональна напряженности электрического поля ТГц излучения в момент времени, соответствующий текущей задержке пробного оптического импульса: $E_{ТГц}(t) \sim \Delta I(t) = I_x(t) - I_y(t)$.

Поскольку процесс генерации ТГц импульсов является периодическим, то, меняя задержку пробного оптического импульса относитель-

но оптического импульса накачки в МВЗ (а следовательно, и относительно детектируемого ТГц импульса), можно регистрировать зависимость напряженности ТГц электрического поля от времени $E_{\text{ТГц}}(t)$.

Отличительная особенность приведенной схемы ТГц спектрометра заключается в том, что ТГц импульсное излучение с частотой следования импульсов 50 МГц модулируется огибающей с частотой 102,4 кГц. Модуляция импульсного ТГц излучения приводит к возникновению модуляции ортогонально поляризованных компонент излучения пробного пучка, регистрируемого БФД, что позволяет повысить ОСШ на выходе БФД. Она реализуется за счет приложения переменного напряжения питания к электродам ФПА во время генерации ТГц импульсов [7].

Методика исследования профилей диэлектрической образцов зубной ткани. Для восстановления профиля диэлектрической проницаемости среды необходимо зарегистрировать два сигнала: сигнал, отраженный от исследуемого объекта, и базовый сигнал, отраженный от эталонной зеркальной поверхности. В качестве эталонной отражающей поверхности обычно используется зеркало с золотым покрытием, имеющее однородный и высокий спектральный коэффициент отражения. На рис. 2 приведена схема регистрации сигналов.

Фокусное расстояние линзы составляет 50 мм и позволяет получить близкий к нормальному угол падения излучения на объект, что необходимо для решаемой обратной задачи. Относительное отверстие линзы $D/f' = 1 : 2$ позволяет сфокусировать ТГц излучение в достаточно малое пятно на поверхности эмали зуба, сохраняя при этом

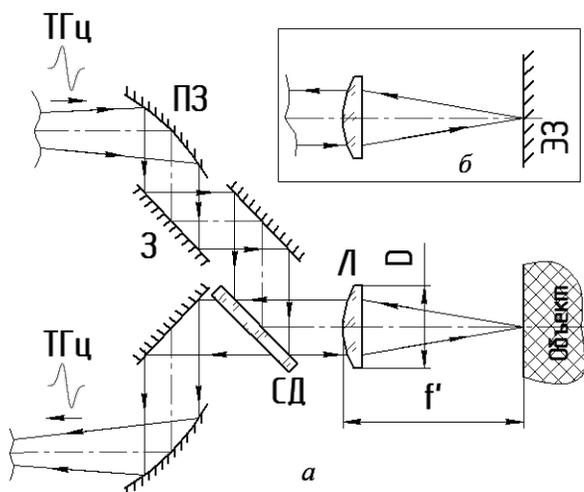


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного отсека ТГц спектрометра при регистрации сигнала образца (а) и при регистрации базового сигнала (б): ТГц — импульс ТГц излучения; ПЗ — внеосевое параболическое зеркало; З — плоское зеркало; СД — светоделитель; Л — линза; ЭЗ — эталонное зеркало

достаточную для анализа профиля диэлектрической проницаемости среды глубину резкости.

Пусть зарегистрированы два сигнала: сигнал от образца $E_s(t)$ и базовый сигнал $E_b(t)$, с амплитудными фурье-спектрами $\tilde{E}_s(\nu_t)$ и $\tilde{E}_b(\nu_t)$. Перечислим основные этапы восстановления профиля диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon(z)$ на основе данных сигналов.

Согласно данному алгоритму, восстановление $\varepsilon(z)$ осуществляется в два этапа. На первом этапе из сигналов $E_s(t)$ и $E_b(t)$ восстанавливается импульсный отклик среды $R(t)$. На втором этапе работы на основе $R(t)$ определяется профиль диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$.

При восстановлении импульсного отклика решаются проблемы фильтрации его низкочастотной и высокочастотной шумовых составляющих, а также проблема интерполяции низкочастотной составляющей $R(t)$. Выражение, описывающее процесс регистрации импульсного отклика в частотной области, использующее винеровскую фильтрацию, имеет вид [8]

$$\tilde{R}(\nu_t) = \frac{\tilde{E}_s(\nu_t)}{\tilde{E}_b(\nu_t)} \left[\frac{\left(\frac{\tilde{E}_b(\nu_t)}{\max_{\nu_t} \{\tilde{E}_b(\nu_t)\}} \right)^2}{\left(\frac{\tilde{E}_b(\nu_t)}{\max_{\nu_t} \{\tilde{E}_b(\nu_t)\}} \right)^2 + \frac{N(\nu_t)}{S(\nu_t)}} \right], \quad (1)$$

где $N(\nu_t)$ — модель спектра мощности шума; $S(\nu_t)$ — модель спектра мощности сигнала.

В качестве модели $N(\nu_t)$ используется модель белого шума, а модель $S(\nu_t)$ строится на основе функции гауссова моноимпульса. Правый множитель в выражении (1) позволяет устранить шумовую составляющую импульсного отклика, обусловленную отсутствием полезной информации в базовом сигнале и сигнале образца в областях частот ниже 0,1 ТГц и выше 3 ТГц. Также в результате фильтрации удается подавить шумы на отдельных частотах, обусловленные флуктуациями влажности воздуха в кювете в ходе измерения.

Для восстановления $\varepsilon(z)$ на основе $R(t)$ необходимо знать низкочастотные составляющие $R(t)$. Определить их можно по известным высокочастотным составляющим импульсного отклика в случае, если пренебречь дисперсионными свойствами среды. Приближение о бездисперсионности среды справедливо для зубной эмали [9]. Удобно использовать тригонометрическую интерполяцию в области временных частот для поиска низкочастотных компонент $R(t)$ [8].

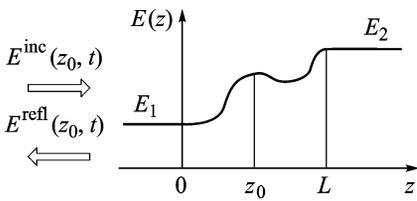


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости объекта от глубины

Зависимость диэлектрической проницаемости от глубины (рис. 3), может быть описано интегралом свертки:

$$E^{refl}(z_0, t) = \int_{-\infty}^t R^+(z_0, t - t') \cdot E^{inc}(z_0, t') dt', \quad (2)$$

где $E^{inc}(z_0, t') = -E_b(t)$ — зависимость напряженности падающего на среду электрического поля от времени, регистрируемая в точке $z = z_0$; $E^{refl}(z_0, t) = E_s(t)$ — зависимость напряженности отраженного средой электрического поля от времени, регистрируемая в точке $z = z_0$; $R^+(z_0, t)$ — ядро интегрального преобразования (оператор рассеяния) при регистрации сигналов в точке $z = z_0$; z — глубина среды.

Ядро интегрального преобразования $R^+(z_0, t)$ характеризует область исследуемой среды в диапазоне глубин $[z_0, L]$. В качестве начала отсчета оси OZ примем первую поверхность среды. Очевидно, что физически можно зарегистрировать сигналы $E^{inc}(z_0, t)$ и $E^{refl}(z_0, t)$ и определить ядро интегрального преобразования $R^+(z_0, t)$ только в случае, если $z_0 < 0$.

Найденному на предыдущем этапе импульсному отклику $R(t)$ соответствует ядро

$$R(t) = R^+(z_0 = 0, t). \quad (3)$$

Полагаем, что диэлектрическая проницаемость среды постоянна при $z < 0$ и $z > L$. Для удобства введем нормированные безразмерные пространственную и временную координаты, а также нормировку ядра интегрального преобразования:

$$l = \int_0^L \sqrt{\varepsilon(z)\varepsilon_0\mu_0} dz;$$

$$x = x(z) = \int_0^z \frac{dz'}{lc(z')}; \quad (4)$$

$$s = \frac{t}{l};$$

$$R(x, s) = lR^+(z, t).$$

Для расчета профиля диэлектрической проницаемости на основе $R(t)$ используется метод вложенных интегральных операторов [10, 11].

Данный метод предполагает, что отражение излучения от среды, имеющей неизменную структуру и свойства в латеральных направлениях и произвольную зависимость диэлектрической проницаемости от глубины (рис. 3), может быть описано интегралом свертки:

где l — время, необходимое для прохождения волнового фронта через исследуемую среду (от 0 до L); x — нормированная оптическая толщина ($0 < x < 1$); s — нормированная временная координата ($0 < s < 2$).

Полагая, что исследуемая среда является непоглощающей, можно записать нелинейное дифференциально-интегральное уравнение, которому будут удовлетворять вложенные ядра $R(x, s)$ интегрального преобразования [10, 11]:

$$\frac{\partial R(x, s)}{\partial x} - 2 \frac{\partial R(x, s)}{\partial s} = -\frac{1}{2} A(x) \int_0^s R(x, s') R(x, s - s') ds', \quad s > 0; \quad (5)$$

$$R(1, s) = 0; \quad s > 0;$$

$$R(x, 0) = -\frac{1}{4} A(x),$$

где

$$A(x) = -\frac{d}{dx} \left[\ln \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon(z(x)) \mu_0}} \right) \right]. \quad (6)$$

— функции, зависящие от профиля диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon(z)$.

Для определения профиля диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$ требуется сперва найти функцию $A(x)$ в ходе численного решения начальной краевой задачи с нелинейным дифференциально-интегральным уравнением (5) и начальными условиями, записанными на основе импульсного отклика среды $R(t)$. Процедура численного решения данной начальной краевой задачи подробно рассмотрена в работе [8].

Зная функцию $A(x)$, можно определить профиль диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon(z(x))$ в соответствии с выражением

$$z(x) = c(0)l \int_0^x \exp \left(-\int_0^{x'} A(x'') dx'' \right) dx', \quad 0 < x < 1; \quad (7)$$

$$\varepsilon(z(x)) = \varepsilon_1 \exp \left(2 \int_0^x A(x') dx' \right), \quad 0 < x < 1.$$

Для повышения качества восстановления профиля диэлектрической проницаемости можно скорректировать функцию $A(x)$ с учетом априорной информации о профиле. Ранее было отмечено, что диэлектрическая проницаемость должна быть постоянной, начиная с некоторой глубины $z = L$. Чтобы обеспечить выполнение данного условия,

необходимо скорректировать функцию $A(x)$, добавив к ней некоторую константу C так, чтобы интеграл функции $f(x) = \int_0^x A(x')dx' = \text{const}$ при $x \rightarrow 1$:

$$A_{corr}(x) = A(x) + C,$$
$$C = \left(\frac{d}{dx} f(x) \right) \Big|_{x \rightarrow 1}. \quad (8)$$

Введение такой коррекции существенно снижает погрешность восстановления профиля диэлектрической проницаемости, обусловленную ошибкой в интерполяции низкочастотных составляющих $R(t)$.

Исследование образцов зубной эмали *in vitro* с различным состоянием деминерализации. Описанный метод восстановления профиля диэлектрической проницаемости среды использовался для исследования состояния эмали тестовых образцов зубов *in vitro*.

Задачей данных исследований являлось установление качественной связи между профилем диэлектрической проницаемости эмали образцов и концентрацией содержащихся в ней минеральных веществ. Проведен эксперимент, в ходе которого состояние деминерализации имитировалось на образцах зубной ткани *in vitro*.

Зубная эмаль образцов обрабатывалась слабыми растворами кислот: 10%-ной азотной кислоты, 6%-ной уксусной кислоты — и в ходе обработки через некоторые равные интервалы времени регистрировались ТГц спектральные характеристики зубной эмали, а также восстанавливались профили ее диэлектрической проницаемости.

Подобная имитация процесса деминерализации справедлива, так как основной причиной процесса вымывания минералов из зубной эмали в полости рта является воздействие на эмаль кислот, образующихся в ротовой полости в результате процессов разложения остатков пищи, работы человека на вредном производстве, а также по ряду других причин.

В процессе травления образцы жестко фиксировались относительно ТГц спектрометра, что обеспечивало регистрацию сигнала, отраженного из одной и той же точки образца, независимо от времени травления.

На рис. 4 приведены результаты исследования образцов: амплитудные спектральные коэффициенты отражения ТГц излучения эмалью в различные моменты времени травления и профили диэлектрической проницаемости эмали в различные моменты времени.

Полученные результаты показывают наличие связи между диэлектрической проницаемостью эмали и концентрацией в ней минеральных веществ, причем по мере травления кислотой концентрация ми-

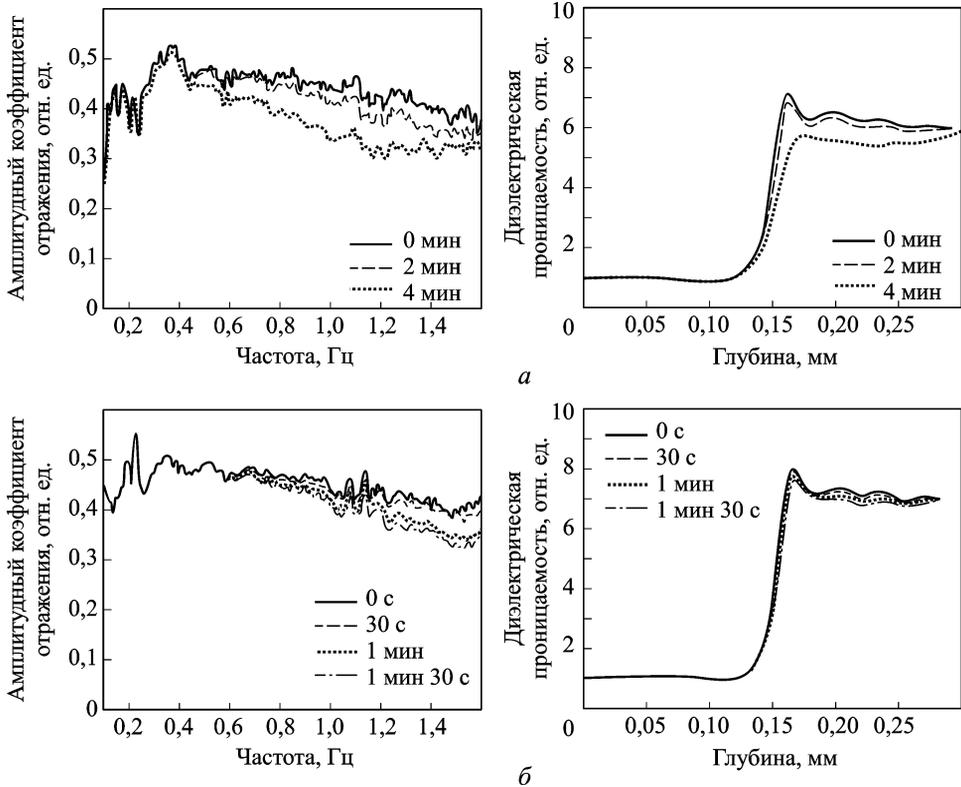


Рис. 4. Результаты исследования образца зубной эмали в процессе травления минералов 10 %-ной азотной (а) и 6 %-ной уксусной (б) кислотами с интервалом регистрации спектральных характеристик и профилей диэлектрической проницаемости 2 мин (а) и 30 с (б)

неральных веществ в эмали зуба снижается так же, как диэлектрическая проницаемость и амплитудный спектральный коэффициент отражения.

Обсуждение результатов. Анализируя приведенные результаты спектральных исследований, можно заключить, что амплитудный спектральный коэффициент отражения ТГц излучения от зубной эмали спадает равномерно в ходе травления с чуть бóльшими изменениями в высокочастотной области спектра. Особенности спектральной характеристики в области 0,2 ТГц обусловлены низким ОСШ на данных частотах как в базовом сигнале, так и в сигнале образца.

При травлении эмали столь слабыми растворами кислот в указанных временных интервалах эмаль не потеряла блеска, однако изменения спектрального коэффициента отражения заметны даже при травлении образца слабой уксусной кислотой в течение всего 30 с.

Различия между зарегистрированными профилями диэлектрической проницаемости эмали зуба наблюдались для обеих кислот и всех интервалов травления. Флуктуация восстановленной функции

$\varepsilon(z)$ на границе раздела сред воздух/эмаль обусловлена наличием шумов Гиббса в зарегистрированном импульсном отклике среды $R(t)$.

Теоретическая точность восстановления $\varepsilon(z)$ среды по глубине составляет 50 мкм, однако на практике достичь столь высокой точности не удастся, что обусловлено в основном погрешностью интерполяции низкочастотной составляющей импульсного отклика.

Приведенные экспериментальные данные получены при исследовании образцов зубной эмали *in vitro* и показывают перспективность разработки метода и аппаратуры диагностики деминерализации эмали зуба *in vivo* на основе ТГц спектроскопии во временной области. Для исследования эмали *in vivo* необходима доработка ТГц спектроскопической системы, направленная на обеспечение возможности быстрой регистрации спектральных характеристик и профилей диэлектрической проницаемости среды в труднодоступных местах.

Заключение. В результате выполнения настоящей работы показана возможность диагностики кариозного поражения эмали зуба на ранних стадиях, а также возможности изучения профиля диэлектрической проницаемости тканей зубной эмали с помощью ТГц спектроскопии.

Разработан и протестирован алгоритм решения обратной задачи, связанной с восстановлением профиля диэлектрической проницаемости бездисперсионной непоглощающей среды.

Проведены исследования образцов эмали зуба *in vitro*, зарегистрированы амплитудные спектральные коэффициенты отражения ТГц излучения от эмали, а также профили диэлектрической проницаемости эмали с различным состоянием деминерализации. Анализ полученных зависимостей показал возможность диагностики состояния деминерализации, так как различия между характеристиками наблюдались даже при минимальных изменениях состояния деминерализации, не приводящих к потере блеска зуба.

Направления дальнейших исследований будут связаны как с разработкой аппаратуры ТГц спектроскопии во временной области, способной регистрировать спектральные характеристики зубной эмали *in vivo* в труднодостижимых местах, так и с разработкой новых методов решения обратных задач, связанных с профилированием диэлектрических сред с помощью ТГц спектроскопии, с установлением количественной связи между диэлектрической проницаемостью ткани зубной эмали и концентрацией содержащихся в ней минеральных веществ.

Результаты перечисленных исследований позволят создать портативную систему, позволяющую проводить диагностику деминерализации эмали *in vivo*, анализировать как профиль диэлектрической проницаемости исследуемого образца, так и профиль концентрации минеральных веществ, содержащихся в эмали зуба.

Данная система позволит быстро и с высокой точностью исследовать состояние эмали пациента в ходе профилактического осмотра, назначать соответствующее лечение в случае необходимости, а также сохранить целостность зубов пациентов за счет сокращения числа хирургических вмешательств.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-31104-мол_а, грант № 12-08-31112-мол_а_вед) и Министерства образования и науки РФ (грант № 14337.21.0898, грант № 14337.21.1282).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Arends J., Dijkman T., Christoffersen.* Average mineral loss in dental enamel during demineralisation // *Caries Research*, 21:249-254. 1987. P. 249–254.
2. *Тодия А.Р., Ландинова В.Д., Жорова Т.Н.* Сравнительная характеристика действия реминерализирующих средств при лечении очаговой деминерализации эмали // *Клиническая стоматология*. 2004. № 1. С. 44–45.
3. *Nuysrrians M.C., Longbottom C.* The challenges of validating diagnostic methods and selecting appropriate gold standards // *J Dental Res*, 83:48-52. 2004. P. 48–52.
4. *Skinner M.M., Kapedia R.* An evaluation of microCT for assessing in 3D the concordance of dental trait expression between the dentin-enamel junction and the outer enamel surface of modern human molars // *Am. J. Phys. Anthropol. Suppl.*, S40. 2005. P. 191.
5. *Lee Y.-S.* Principles of terahertz science and technology. Springer. 2009. P. 340.
6. *Зайцев К.И., Фокина И.В., Федоров А.К., Юрченко С.О.* Анализ спектральных характеристик воды и льда в ТГц-области спектра в процессе фазового перехода // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2012. Спецвыпуск “Моделирование и исследование физических и технических систем”. С. 113–119.
7. *Wilmink J., Ibey B., Tongue T.* Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues // *Journal of Biomedical Optics*, 16 (4). 2011. P. 1–10.
8. *Диагностика деминерализации эмали зуба с помощью ТГц спектроскопии / К.И. Зайцев, В.Е. Карасик, С.О. Юрченко и др.* // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2013. Спецвыпуск “Современные проблемы оптотехники”.
9. *Pickwell E., Wallace V.P., Cole B.E.* A Comparison of TPI with microradiography for depth imaging of enamel demineralization in vitro // *Caries Reserch*, 41:49-55. 2007. P. 49–55.
10. *Kristensson G., Krueger R.J.* Direct and inverse scattering in the time domain for a dissipative wave equation. II. Simultaneous reconstruction of dissipation and phase velocity profiles // *J. Math. Phys.* 27, 1986. P. 1667–1682.
11. *Kristensson G., Krueger R.J.* Direct and inverse scattering in the time domain for a dissipative wave equation. III. Scattering operators in the presence of a phase velocity mismatch // *J. Math. Phys.* 28. 1987. P. 1683–1693.

REFERENCES

1. *Arends J., Dijkman T., Christoffersen.* Average mineral loss in dental enamel during demineralisation. *Caries Res.*, 1987, vol. 21, pp. 249–254.
2. *Todiya A.R., Landinova V.D., Zhorova T.N.* Comparative study of remineralizing agents in the treatment of focal enamel demineralization. *Klin. Stomatol.* [Clin. Dent.], 2004, no. 1 (in Russ.).

3. Huysmans M.C., Longbottom C. The challenges of validating diagnostic methods and selecting appropriate gold standards. *J. Dental Res.*, 2004, vol. 83, pp. 48–52.
4. Skinner M.M., Kapedia R. An evaluation of micro CT for assessing in 3D the concordance of dental trait expression between the dentin-enamel junction and the outer enamel surface of modern human molars. *Am. J. Phys. Anthropol. Suppl.*, 2005, vol. 40, p. 191.
5. Lee Y.-S. Principles of terahertz science and technology. New York, Springer, 2009. 340 p.
6. Zaytsev K.I., Fokina I.V., Fedorov A.K., Yurchenko S.O. Analysis of spectral characteristics of liquid water and ice at terahertz frequencies during phase transition. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Ser. Estestv. Nauki. Spetsvyp. "Modelirovanie fizicheskikh i tekhnicheskikh protsessov"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Ser. Nat. Sci. Spec. Issue "Modeling of physical and technological processes"], 2012, pp. 113–119 (in Russ.).
7. Wilmink J., Ibey B., Tongue T. Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues. *J. Biomed. Opt.*, 2011, vol. 16, no. 4.
8. Zaytsev K.I., Karkasik V.E., Yurchenko S.O., Sokolova I.V., Ryzhiy V.I. Diagnosis of demineralization of tooth enamel by THz spectroscopy. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Ser. Priborostr. Spetsvyp. "Sovremennye problemy optotekhniki"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Ser. Instrum. Eng. Spec. Issue "Modern optical engineering problems"], 2012 (in Russ.).
9. Pickwell E., Wallace V.P., Cole B.E. A Comparison of TPI with microradiography for depth imaging of enamel demineralization in vitro. *Caries Res.*, 2007, vol. 41, pp. 49–55.
10. Kristensson G., Krueger R.J. Direct and inverse scattering in the time domain for a dissipative wave equation. II. Simultaneous reconstruction of dissipation and phase velocity profiles. *J. Math. Phys.*, 1986, no. 27.
11. Kristensson G., Krueger R.J. Direct and inverse scattering in the time domain for a dissipative wave equation. III. Scattering operators in the presence of a phase velocity mismatch. *J. Math. Phys.*, 1987, no. 28.

Статья поступила в редакцию 25.12.2012

Светлана Ивановна Володарская — канд. мед. наук, врач-стоматолог высшей категории, заведующая лечебно-хирургическим отделением ГБУЗ СП 53 ДЗ, старший научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.I. Volodarskaya — Cand. Sci. (Med.), doctor-stomatologist of higher category, head of treatment-surgery department, senior researcher of the Research Institute for Radio-Electronic Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of five publications.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Кирилл Игоревич Зайцев — младший научный сотрудник научно-образовательного центра "Фотоника и ИК-техника" при МГТУ им. Н.Э. Баумана, аспирант кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области цифровой обработки изображений; стереоскопических методов восстановления трехмерных образов объектов; использования терагерцовой спектроскопии и терагерцевых изображающих систем в медицинской диагностике. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

K.I. Zaitsev — junior researcher of “Photonics and IR technology” scientific-educational center under the Bauman Moscow State Technical University, post-graduate of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications in the field of digital processing of images, stereoscopic methods of reconstruction of 3D images of objects, application of terahertz spectroscopy and terahertz imaging systems to medical diagnostics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Валерий Ефимович Карасик — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы”, директор научно-образовательного центра “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 190 научных работ в области лазерных систем видения, терагерцовых изображающих систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.Ye. Karasik — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, director of “Photonics and IR technology” scientific-educational center under the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 190 publications in the field of laser systems of vision, terahertz imaging systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Ирина Николаевна Фокина — младший научный сотрудник научно-образовательного центра “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана, аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области рассеяния лазерного излучения, использования терагерцовых изображающих систем и терагерцовой спектроскопии в целях обеспечения безопасности.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

I.N. Fokina — junior researcher of “Photonics and IR technology” scientific-educational center under the Bauman Moscow State Technical University, post-graduate of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of laser radiation scattering, application of terahertz imaging systems and terahertz spectroscopy to medical diagnostics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Екатерина Владимировна Новицкая — студентка кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы. Специализируется в области терагерцовой спектроскопии и ее биомедицинских приложений, терагерцовых изображающих систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.V. Novitskaya — student of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a publication. Specializes in the field of terahertz spectroscopy and its biomedical applications, terahertz imaging systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.