

УДК 681.784.88, 535.36

## РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА КАРИЕСА ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

А.А. Езерская, И.В. Романов, О.А. Смолянская, Я.В. Грачев

Исследованы угловое распределение прошедшего и отраженного терагерцового сигнала, а также терагерцовые спектры пропускания и отражения твердых тканей зуба человека (нормальных и пораженных кариесом). Выявлены характерные для кариеса терагерцовые линии поглощения, что может позволить диагностировать заболевание на ранних стадиях. Кариозное пятно увеличивает отражательную способность терагерцового сигнала, что дает уникальную возможность достаточно достоверно диагностировать кариес *in vivo* на ранних стадиях.

**Ключевые слова:** терагерцовая спектроскопия, терагерцовая фотометрия, диагностика, кариес.

### Введение

На сегодняшний день диагностика кариеса зубов человека представлена осмотром, методом зондирования, рентгенологическим исследованием, витальным окрашиванием, измерением биоэлектрического потенциала, электроодонтодиагностикой, трансиллюминационной диагностикой, лазерной флюориметрией. Каждый из представленных методов недостаточно точен и безопасен, особенно на ранних стадиях развития заболеваний [1–3]. Терагерцовое (ТГц) излучение, как известно, обладает высокой проникающей способностью, разрешением порядка 100 мкм, и оно безопасно для биотканей человека [4–5]. В связи с этим исследование оптических свойств твердых тканей зуба в ТГц диапазоне частот является актуальной задачей. Маловероятные трудности в ТГц диагностике могут быть связаны с содержанием некоторой доли металлов и их соединений в пломбирующих материалах. В настоящей работе сначала исследовались свойства ТГц излучения без образца – профиль ТГц излучения, длина перетяжки, диаметр пучка на полувысоте в перетяжке и угловая расходимость излучения. Затем были проведены исследования углового распределения излучения, прошедшего через образец зуба, зависимости прошедшего излучения от толщины образца, ТГц спектров пропускания и отражения нормальной и кариозной эмали зуба, а также образца дентина.

### Экспериментальные установки и методики

Для экспериментального исследования углового распределения сигнала, прошедшего через образец зуба, использовался ТГц фотометр ( $P_{cp} = 10 \pm 4$  мкВт;  $\tau_{имп} = 3$  пс;  $\nu = 0,1-1,0$  ТГц) [6]. В эксперименте были реализованы схемы исследования полного, коллимированного и диффузного пропускания твердых тканей зуба человека *in vitro*, представленные на рис. 1, а, б, в, соответственно.

Свет, попадающий на диафрагму, на первой схеме (рис. 1, а) проходил только через образец твердой ткани зуба, на второй схеме (рис. 1, б) использовалась диафрагма, которая пропускала в основном коллимированный свет, а диффузный отражала. Таким образом, формировалась система «апертура – твердая ткань зуба – апертура». На третьей схеме (рис. 1, в) на образце помещалась круглая непрозрачная маска, которая отражала коллимированный свет. Приемник перемещался в диапазоне углов  $\pm 90^\circ$  относительно нормали к поверхности образца с шагом  $5^\circ$ . Полученные данные нормировались на максимальное значение, в результате чего получилось угловое распределение интенсивности измеряемой величины в относительных единицах.

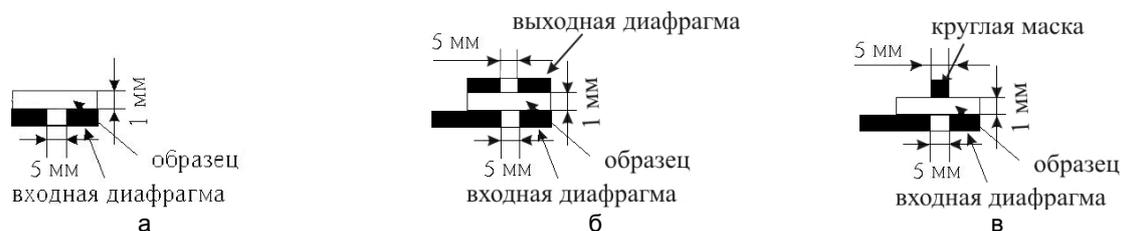


Рис. 1. Схематическое изображение крепления образца. Измерение оптического пропускания *in vitro*: полного (а); коллимированного (б); диффузного (в)

Для экспериментального исследования ТГц спектров пропускания и отражения образцов зуба использовался спектрофотометр ( $P_{cp} = 48 \pm 4$  мкВт,  $\tau_{имп} = 3$  пс,  $\nu = 0,1-1,0$  ТГц) и рефлектометр ( $P_{cp} = 30 \pm 3$  мкВт,  $\tau_{имп} = 3$  пс,  $\nu = 0,1-1,0$  ТГц) [7]. В экспериментах для каждого образца производилось по 5 измерений. Статистическая обработка результатов производилась в предположении нормальности распределения Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95. Для исследований использовались коренные зубы человека, удаленные по медицинским показаниям по стандартной методике. Основной причиной служил хронический периодонтит вследствие осложнения среднего или глубокого кариеса. Диагностика заболевания проводилась методом зондирования, электроодонтодиагностики и термодиагностики, также использовалась рентгенография. От этих зубов спиливанием получали плоскопараллельные пластины эма-

ли и дентина толщиной 1, 2, 3, 4 и 6 мм. Образцы твердых тканей зуба человека хранились в медицинском антисептическом растворе на основе хлорамина при температуре 5–8°C в течение пяти дней. Раствор позволял поддерживать твердые ткани зуба в состоянии, близком к естественному. Исследовались образцы клинически нормальной эмали (НЭ), нормальной дентина (НД) и кариозной эмали (КЭ).

**Угловое распределение потока ТГц излучения, прошедшего через твердые ткани зуба человека**

В ходе исследования был установлен профиль ТГц излучения без образца (рис. 2) и распределение его поля в пространстве (рис. 3).

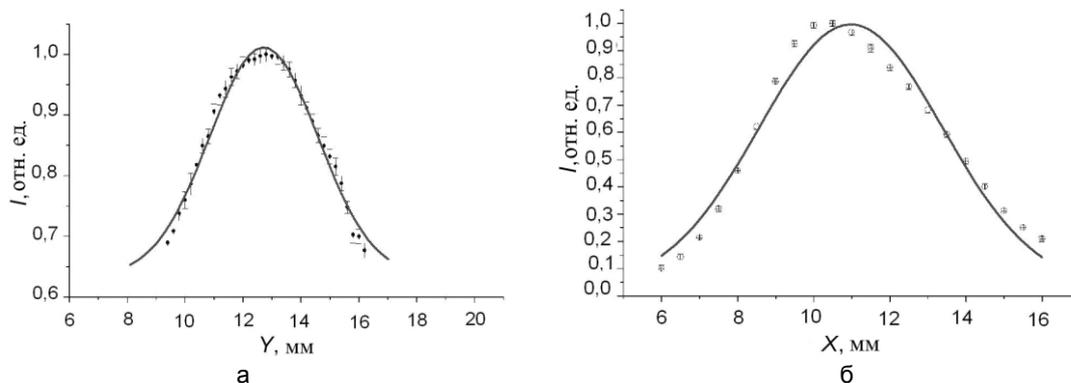


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности ТГц излучения по оси X (а); по оси Y (б)

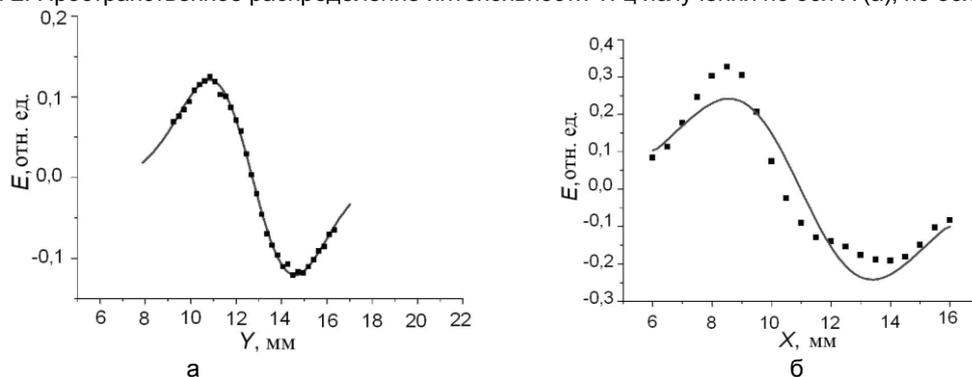


Рис. 3. Пространственное распределение поля ТГц излучения по оси X (а); по оси Y (б)

Угловая расходимость ТГц излучения составляла  $14 \pm 0,35^\circ$ , а исследования углового распределения потока излучения, прошедшего через твердые ткани зуба человека проводилось в области фокусировки пучка, где перетяжка на уровне 95% энергии была протяженностью 20 мм и 5 мм в диаметре.

Диффузная составляющая потока излучения, прошедшая через образец, находится на уровне шума, поэтому можно считать, что излучение рассеивается незначительно.

Рассмотрим изменение сигнала при прохождении через образцы клинически нормальных и кариозных твердых тканей зуба. Как показано на рис. 4, мощность потока излучения, проходящего через образцы клинически нормальных твердых тканей зуба человека, в 2,5–3 раза больше мощности потока излучения, проходящего через пораженные кариесом ткани.

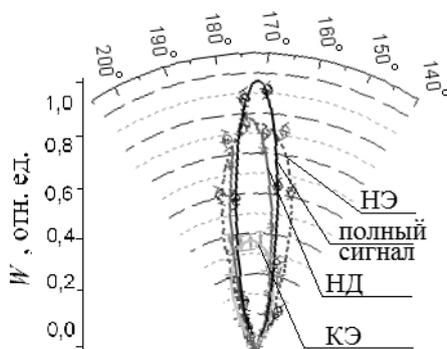


Рис. 4. Экспериментально установленное угловое распределение полного сигнала, а также сигнала, прошедшего через НД, НЭ и КЭ

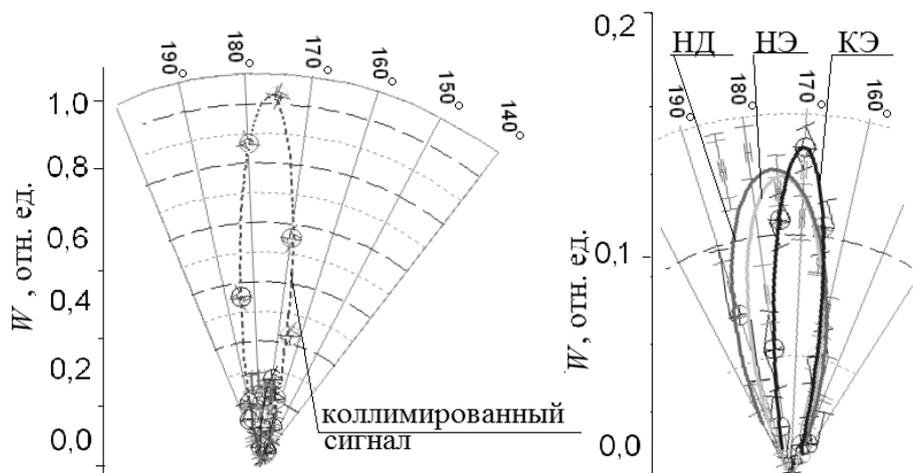


Рис. 5. Экспериментально установленное угловое распределение коллимированного сигнала, прошедшего через НД, НЭ и КЭ

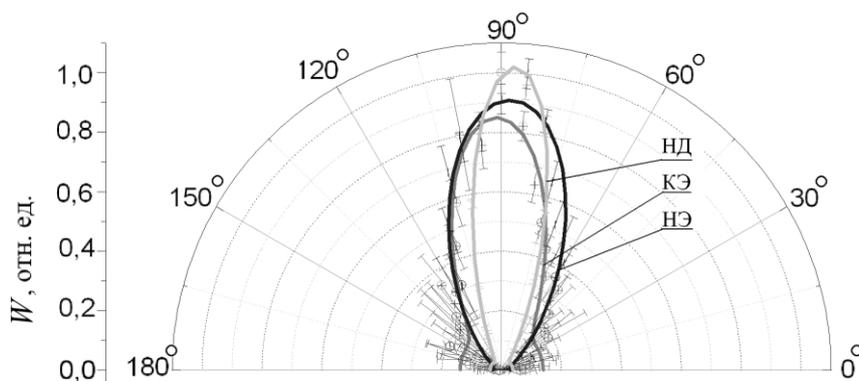


Рис. 6. Экспериментально установленное угловое распределение сигнала, отраженного от НД, НЭ и КЭ

Картина углового распределения потока отраженного излучения (рис. 6) имеет особенность – некоторый ореол вблизи образца, причем у кариозного образца ореол больше, что можно объяснить большей шероховатостью поверхности, нежели у образца нормальной твердой ткани зуба человека.

Угловое распределение потока излучения после взаимодействия с твердыми тканями зуба человека (рис. 4–6) дает не только наглядную картину, но и важные для моделирования процессов, связанных с взаимодействием ТГц излучения с биологическими объектами, параметры, такие как угол рассеяния излучения.

При исследовании зависимости пропускания твердых тканей зуба от толщины образца было экспериментально установлено, что при толщине 1 мм мощность сигнала уменьшается в 34,7 раз, при толщине образца 3 мм сигнал сопоставим с шумом, т.е. при данной толщине образец не пропускает терагерцовое излучение (рис. 7).

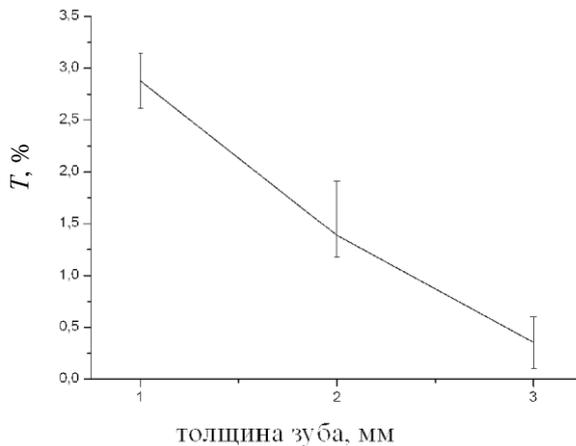


Рис. 7. Зависимость пропускания НЭ от толщины образца

### Терагерцовые спектры твердых тканей зуба человека

В ходе эксперимента было установлено (рис. 8), что пропускание КЭ составляет порядка 10%, НД – в среднем порядка 30%, а НЭ – порядка 40%. Следовательно, можно говорить о том, что пропускание твердых тканей зуба человека в ТГц диапазоне электромагнитных волн имеет прямую зависимость от степени поражения кариесом. Для кариозных твердых тканей зуба были установлены характерные линии поглощения – 0,66 ТГц и 0,77 ТГц.

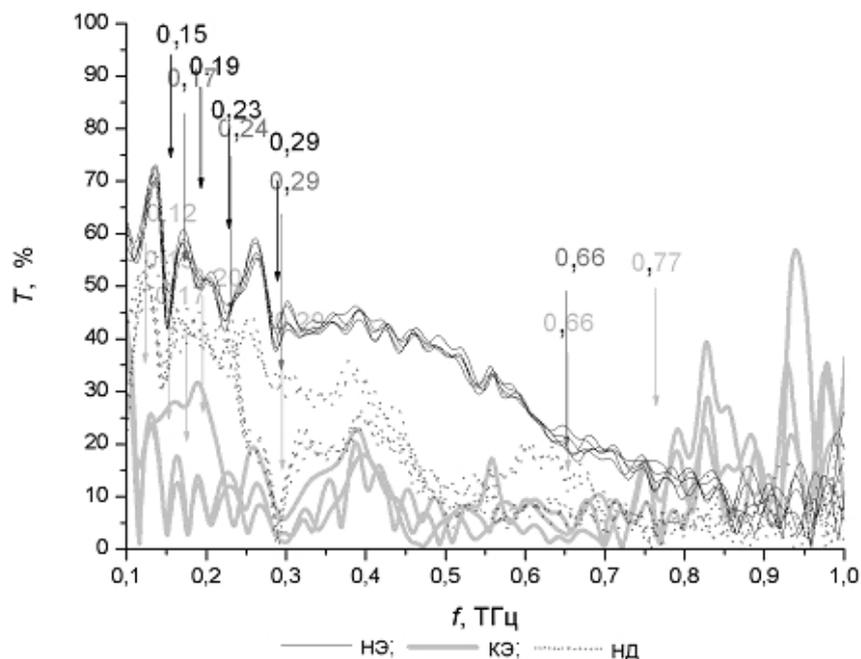


Рис. 8. Спектры пропускания КЭ, НЭ и НД

Несмотря на очевидно проявляющуюся интерференцию (резкие пики в спектральной картине), можно заключить, что отражение от НЭ в интервале 0,44–0,64 ТГц находится на уровне 20–15%, в то время как сильно пораженные кариесом образцы эмали и дентина, как и образцы с малым кариозным пятном, имеют отражение на уровне 40% (рис. 9).

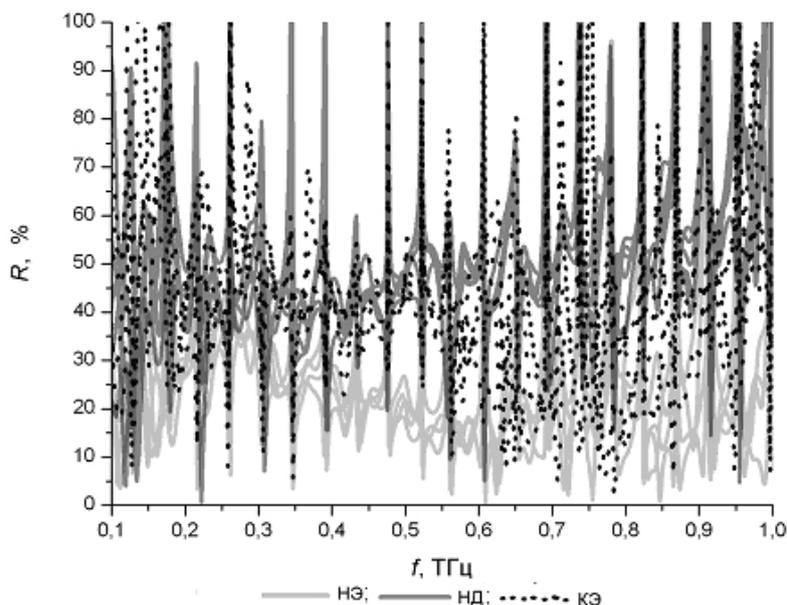


Рис. 9. Спектры отражения КЭ, НЭ и НД

### Результаты численного моделирования отражения ТГц сигнала от эмали с кариесом

На рис. 10 представлены результаты вычислений методом Монте-Карло образца КЭ. Здесь для вычислений ширина ТГц пучка составляла 3 мм;  $\lambda = 100$  мкм; использовалось около 29700 лучей. Оптические константы взяты из эксперимента и работы [8]. Вычисления с помощью программного пакета TracePro позволили исследовать обратное рассеяние и отражение эмали, в составе которой содержатся кариозные области сложной формы. Вычисления, проведенные на эмали с кариозными областями простой формы, не дали результатов обратного рассеяния.



Рис. 10. ТГц отражение образца эмали зуба с кариозными областями

#### Заключение

Исследованы характеристики ТГц излучения диапазона 0,1–1 ТГц в области образца и приемника, получено угловое распределение прошедшего и отраженного ТГц сигнала для клинически кариозной, нормальной эмали и нормальной дентина зуба человека. Эти данные позволят проводить численное моделирование распространения ТГц излучения через твердые ткани зуба при различных конфигурациях оптической схемы.

Сохранение воды в составе вещества твердых тканей зуба человека привело к повышению уровня поглощения импульсного ТГц излучения диапазона 0,1–1 ТГц. Несмотря на это, пропускание для различной степени кариозно измененных твердых тканей зуба человека составило 20–40%, причем наименьшее пропускание наблюдалось у образцов, наиболее пораженных кариесом, а наибольшее пропускание – у клинически нормальных образцов зуба, что может позволить диагностировать стадию заболевания. Выявлены характерные для кариеса линии поглощения, что позволяет диагностировать заболевание на ранних стадиях.

Кариозное изменение твердых тканей зуба человека прямо пропорционально влияет на отражательную способность зуба в ТГц диапазоне в интервале 0,44–0,64 ТГц, причем даже незначительное кариозное пятно увеличивает отражательную способность в два раза, что дает уникальную возможность достаточно достоверно диагностировать кариес *in vivo* на ранних стадиях. Исследования ТГц спектров пропускания и отражения твердых тканей зуба, здоровых и различной степени поражения кариесом, показали возможность применения такого излучения в стоматологии для диагностических целей.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (ГК №14.740.12.0841, ГК №16.513.11.3070). Также выражаем благодарность коллективу Санкт-Петербургской государственной стоматологической поликлиники № 4, особенно главному врачу А.Г. Климову, за предоставление образцов.

#### Литература

1. Stomatlife. Диагностика кариеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stomatlife.ru/articles/stomat/240-diagnostikakariesa>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
2. 03-Скорая Помощь. Кариес. Диагностика, профилактика и лечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.03.ru/section/stomatology/article/21>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
3. Энциклопедия болезней. Диагностика кариеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://my-mediks.ru/content/diagnostika-kariesa>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.07.2011).
4. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Corvalis: Springer Science+Business Media, 2009. – 347 p.
5. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. – N.Y.: Springer Science+Business Media, 2010. – 246 p.

6. Грачев Я.В., Куклин И.А., Герасимов И.В., Смолянская О.А. Козлов С.А., Беспалов В.Г. Исследование воздействия излучения 0,05–2 ТГц на биоткани разной толщины в медицинской диагностике // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 11. – С. 92–94.
7. Bespalov V.G., Gorodetsky A.A., Grachev Y.V., Kozlov S.A., Smolyanskaya O.A. Influence of THz broadband pulse radiation on some biotissues // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7547. – P. 754707-1.
8. Nazarov M.M., Shkurinov A.P., Kuleshov E.A., Tuchin V.V. Terahertz pulsed spectroscopy of biological tissues // Quantum Electronics. – 2008. – V. 38. – № 7. – P. 647–654.

- Езерская Анна Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, a.a.ezerskaya@gmail.com
- Романов Илья Владимирович* – Томский государственный университет, аспирант, roil@elefot.tsu.ru
- Смолянская Ольга Алексеевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, o\_smolyanskaya@mail.ru
- Грачев Ярослав Владимирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grachev\_y@mail.ru