

## ИССЛЕДОВАНИЕ *in vivo* МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ ЭМАЛИ ПОД ДЕСНОЙ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА

В. Т. ПРОКОПЕНКО<sup>1</sup>, Е. Е. МАЙОРОВ<sup>2</sup>, Л. И. ШАЛАМАЙ<sup>3</sup>, М. В. ХОХЛОВА<sup>4</sup>,  
Б. Д. КАТУНИН<sup>5</sup>, Д. Д. КАПРАЛОВ<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС,  
194044, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: majorov\_ee@mail.ru

<sup>3</sup> Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова,  
197022, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Военно-морской политехнический институт,  
196604, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

<sup>6</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
193232, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются возможности использования автоматизированной когерентно-ограниченной интерферометрической системы для томографических измерений в стоматологии. Приведены результаты экспериментальных исследований *in vivo* минерализованных отложений под десной в области верхнечелюстной и нижнечелюстной арок первого и второго моляров. Проанализирована зависимость распределения коэффициента отражения по глубине десны при отсутствии минерализованного отложения и при его наличии. Получены результаты измерений геометрических параметров минерализованных отложений, погрешность не превышает 1 мкм. Приведена схема автоматизированной когерентно-ограниченной интерферометрической системы и ее технические характеристики.

**Ключевые слова:** интерферометрическая система, томография, минерализованное отложение, моляр, коэффициент отражения, погрешность измерений, диапазон измерений

**Введение.** Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах биологических объектов [1, 2], в частности минерализованных отложений, находящихся в подповерхностных слоях десны и на глубинах 3...4 мм, — важная задача для стоматологии. В настоящее время для обнаружения минерализованных отложений (зубной камень) под десной используются различные методы и технические средства. Приборы для обнаружения зубного камня выпускаются такими фирмами, как Dexis, Gendex, Planmeca и т.д. Эти компании производят рентгеновское оборудование (визиографы и интраоральные рентгены), позволяющее измерять границу формы зубного камня с точностью до 150 мкм, однако на цифровой фотографии граница отложения имеет существенную погрешность (размытость) и варьируется от 50 до 150 мкм. В этом случае врачу-стоматологу сложно определить начальную стадию формирования минерализованного отложения, на какой глубине оно находится и какую имеет реальную форму.

Основной недостаток рентгеновских приборов — доза облучения здоровой биологической ткани, кроме того, они не пригодны для решения динамических задач. Применение бесконтактных методов измерения параметров диффузно отражающих объектов позволяет исключить указанные недостатки. Одним из основных таких методов является использование

автоматизированных когерентно-ограниченных интерферометрических систем (АКОИС) [3—10]. Функционирование такой системы основано на анализе светового излучения, отраженного от поверхности исследуемого объекта. АКОИС по точности измерений превосходят рентгеновские аппараты, малогабаритны, удовлетворяют требованиям производственного контроля, просты в эксплуатации.

В настоящей статье представлены результаты томографического исследования *in vivo* минерализованных отложений под десной с использованием автоматизированной когерентно-ограниченной интерферометрической системы.

**АКОИС.** Экспериментальные исследования зубного камня проводились на разработанной АКОИС. Схема оптического томографа (волоконный вариант), представлена на рис. 1, где 1 — источник излучения, 2 — лазер подсветки, 3, 4 — направленные ответвители, 5 — устройство поперечного сдвига, 6 — устройство продольного сдвига, 7, 8 — объективы, 9 — объект, 10 — зеркало, 11 — фотоприемник, 12 — блок обработки, 13 — компьютер.

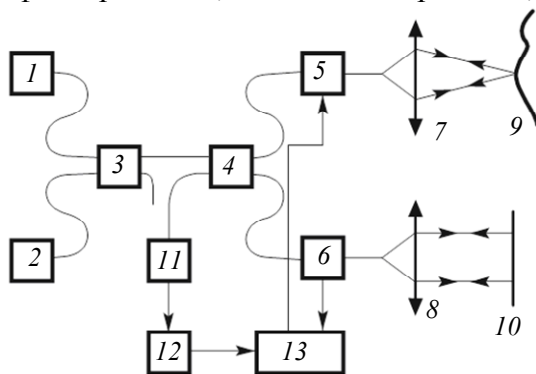


Рис. 1

Эта система реализована на основе одномодового волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с полупроводниковым суперлюминесцентным диодом ( $\lambda = 1,65$  мкм,  $\Delta\lambda = 70$  нм, длина когерентности  $l_c = 30$  мкм, мощность излучения на поверхности объекта 10 мВт).

Исследуемый объект помещается в одно из плеч интерферометра. Оптическая длина другого плеча сканируется с постоянной линейной скоростью  $v$ . Сигнал интерференции на доплеровской частоте  $f = 2v/\lambda$  пропорционален коэффициенту отражения ( $R$ ) нерассеянного компонента от оптической неоднородности (минерализованных отложений) внутри объекта, положение которой по глубине определяется равенством оптических путей, пройденных интерферирующими лучами света. Пространственная разрешающая способность в продольном направлении (в глубь объекта) определяется длиной когерентности. Сканирование в поперечном направлении осуществляется механооптической системой, перемещающей сфокусированное пятно зондирующего излучения вдоль поверхности объекта. Поперечное разрешение локации определяется радиусом  $d$  фокального пятна. В ходе эксперимента значение  $d < 20$  мкм выбиралось исходя из условия, что рэлеевская длина перетяжки  $2\pi n d^2/\lambda$  (где  $n = 1,35$  — типичный показатель преломления биотканей) должна быть не меньше продольного размера зондируемой области. Для детального разрешения исследуемых участков изображения необходимо уменьшить  $d$  при соответствующем снижении продольного диапазона сканирования.

Принимаемый сигнал интерференции проходит стадии аналоговой и цифровой обработки. Последующая визуализация сигнала позволяет получить в реальном времени двумерные изображения когерентного компонента света. Для идентификации точки анализа на поверхности исследуемого объекта используется дополнительный лазерный диод в видимом диапазоне.

Интерферометр Майкельсона — не единственный, на основе которого можно построить автоматизированную когерентно-ограниченную интерферометрическую систему [11—14]. Так, в работе [15] рассматривается использование интерферометра Захарьевского — вследствие своей осесимметричности система является более компактной и механически стабильной по сравнению с интерферометром Майкельсона. Однако предлагаемая система превосходит последний по энергетическим потерям.

**Исследование *in vivo* минерализованных отложений под десной.** Результаты исследований *in vivo* представлены на рис. 2, а, б графиками распределения коэффициента отражения  $R$  по глубине  $z$  десны в верхнечелюстной (а) и нижнечелюстной (б) арках при отсутствии минерализованных отложений в области первого и второго моляров (кривые 1 и 2) и при наличии отложений (кривые 3 и 4).

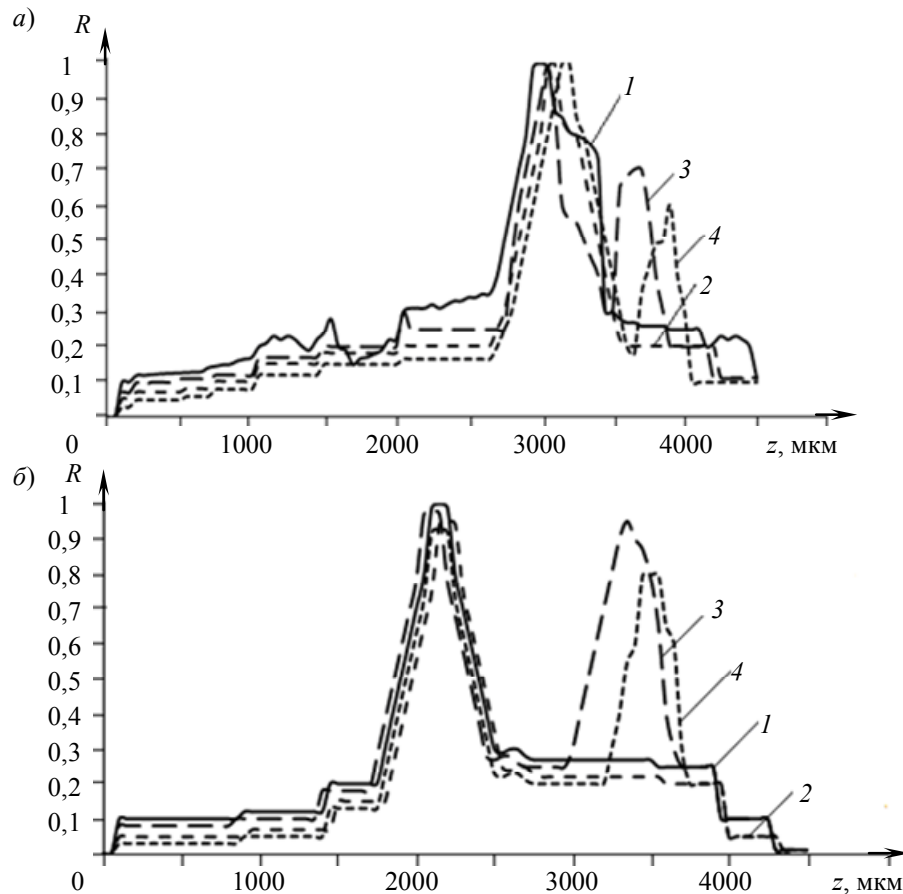


Рис. 2

Измерения проводились с использованием АКОИС (см. рис. 1). При динамических измерениях, к которым относятся измерения *in vivo*, необходимо было обеспечить независимость результатов от возможных смещений контролируемой области в ходе сканирования. В этом случае использовался специальный прикусной блок, который фиксировал верхнечелюстную и нижнечелюстную арки.

В эксперименте участвовали 25 пациентов, имеющих минерализованные отложения в исследуемых областях, и 25 пациентов, не имеющих таких отложений.

Площадь анализируемого участка поверхности десны — 6×6 мм, глубина анализа — от 0 до 4 мм. Измерения проводились поточечно с частотой 46 Гц. Представленные на графиках кривые (см. рис. 2) получены в результате усреднения измерений в 4 тыс. точек исследуемой области десны. Для регистрации данных на таком участке системой производились измерения по одной координате — линейно, а по другой — по синусоидальному закону [16, 17]. Исследуемый участок десны в измеряемой области показан на рис. 3.

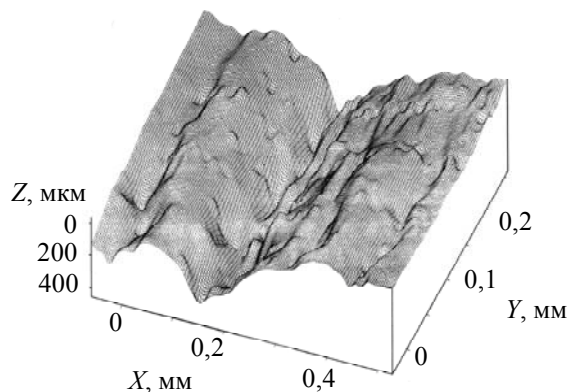


Рис. 3

Анализируемый участок десны (область первого и второго моляров) зондировался по нормали. Система функционировала в режиме сканирования. В этом случае модуляция разности хода интерферирующих волн (пучков) позволяет получить распределения амплитуды отраженного сигнала по глубине подповерхностного слоя десны. Измерения проводились при следующих характеристиках системы: погрешность измерений  $\sigma_z = (0,03 - 0,1)l_c$  при  $\theta = 0 \dots 30^\circ$  ( $\theta$  — угол зондирования) и  $\sigma_z = (0,3 - 0,8)l_c$  при  $\theta = 45 \dots 60^\circ$ ; среднее расстояние от световода до объекта — 2...3 мм.

**Заключение.** Экспериментальные результаты исследования минерализованных отложений под десной на глубине от 3000 до 4000 мкм показывают перспективность и актуальность использования предложенной автоматизированной когерентно-ограниченной интерферометрической системы для томографических исследований в стоматологии. Полученные томограммы позволяют обнаруживать *in vivo* зубной камень под десной на ранней стадии его формирования с точностью до 1 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров Е. Е., Котов И. Р., Хонов В. В. Интерферометрические исследования биологических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 15. С. 70—72.
2. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Когерентно-ограниченная интерферометрическая система в исследовании биологических объектов // Медицинская техника. 2012. № 3 (237). С. 24—26.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
4. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
5. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ.; Под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
6. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
7. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
8. Геликонов В. М. и др. Когерентная оптическая томография микронеоднородностей биотканей // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61, вып. 2. С. 149—153.
9. Hausler G., Lindner M. W. Coherence radar and spectral radar – new tools for dermatological diagnosis // J. Biomed. Opt. 1998. Vol. 3, N 1. P. 21—31.
10. Большаков О. П., Котов И. Р., Хонов В. В. Система для измерения рельефа поверхности и упругости кожи // Медицинская техника. 1997. № 5. С. 35—38.
11. Hasier G. et al. Range sensing by shearing interferometry // Appl. Optics. 1988. Vol. 27, N 22. P. 4638—4644.
12. Hasier G., Herrmann F. Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle // Appl. Optics. 1988. Vol. 27, N 22. P. 4631—4637.
13. Gu F., Hung Y., Chen F. Iteration algorithm for computer-aided speckle interferometry // Appl. Optics. 1994. Vol. 33, N 23. P. 5308—5317.

14. Majorov E. E., Prokopenko V. T. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // Biomedical Engineering. 2012. Vol. 46, N 3. P. 109—111.
15. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
16. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Черняк Т. А. Оптико-электронная компьютерная система для обнаружения внешних агентов в подповерхностных слоях кожного покрова // Медицинская техника. 2016. № 2. С. 7—10.
17. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Mashek A. C., Tsygankova G. A., Kurlov A. V., Khokhlova M. V., Kirik D. I., Kapralov D. D. Experimental study of metrological characteristics of the automated interferometric system for measuring the surface shape of diffusely reflecting objects // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60 (10). P. 1016—1021.

**Сведения об авторах**

- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра световых технологий и оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий; E-mail: majorov\_ee@mail.ru
- Людмила Ивановна Шаламай** — канд. мед. наук, доцент; Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; E-mail: l.shalamay@mail.ru
- Марина Владимировна Хохлова** — канд. пед. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра физики; E-mail: mvxox@mail.ru
- Борис Дмитриевич Катунин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; E-mail: bkatunin@mail.ru
- Дмитрий Дмитриевич Капралов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств; E-mail: dmitry\_kapralov@mail.ru

Поступила в редакцию  
26.11.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Хохлова М. В., Катунин Б. Д., Капралов Д. Д. Исследование *in vivo* минерализованных областей эмали под десной с помощью интерферометрического прибора // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 641—646.

**IN VIVO STUDY OF MINERALIZED SCURF UNDER THE GUMS  
USING AN INTERFEROMETRIC DEVICE**

V. T. Prokopenko<sup>1</sup>, E. E. Maiorov<sup>2</sup>, L. I. Shalamay<sup>3</sup>, M. V. Khokhlova<sup>4</sup>,  
B. D. Katunin<sup>5</sup>, D. D. Kapralov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>University of the EurAsEC Inter-Parliamentary Assembly,  
194044, St. Petersburg, Russia  
E-mail: majorov\_ee@mail.ru

<sup>3</sup>Pavlov First St. Petersburg State Medical University,  
197022, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup>Naval Polytechnical Institute,  
196604, St. Petersburg, Pushkin, Russia

<sup>6</sup>The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications,  
193232, St. Petersburg, Russia

The possibilities of using an automated coherent-limited interferometric system for tomographic measurements in dentistry are considered. Results of experimental studies *in vivo* of mineralized deposits under the gum in the area of the maxillary and mandibular arches of the first and second molars are

presented. Dependence of the reflection coefficient distribution on the depth of the gums in the absence of mineralized sediment and in its presence is analyzed. The results of measurements of the geometric parameters of mineralized deposits are shown to have an error less than 1  $\mu\text{m}$ . A scheme of the automated coherent-limited interferometric system and its technical characteristics are presented.

**Keywords:** interferometric system, tomography, mineralized sediments, molar, reflection coefficient, measurement error, measurement range

#### REFERENCES

1. Majorov E.E., Kotov I.R., Khopov V.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2004, no. 15, pp. 70–72. (in Russ.)
2. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Biomedical Engineering*, 2012, no. 3(47), pp. 109–111.
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1970.
4. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 1976, 926 p. (in Russ.)
5. Malacara D. *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, 2007, 888 p.
6. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryayev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
7. Afanas'yev V.A. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1968, 263 p. (in Russ.)
8. Gelikonov V.M., Gelikonov G.V., Kuranov R.V., Pravdenko K.I., Sergeev A.M., Feldshtein F.I., Khanin Ya.I., Shabanov D.V., Gladkova N.D., Nikulin N.K., Petrova G.A., Pochinko V.V. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1995, no. 2(61), pp. 158–162.
9. Hausler G., Lindner M.W. *F. Biomed. Opt.*, 1998, no. 1(3), pp. 21–31.
10. Bol'shakov O.P., Kotov I.R., Khopov V.V. *Biomedical Engineering*, 1997, no. 5, pp. 285–288.
11. Hasier G. et al. *Appl. Optics*, 1988, no. 22(27), pp. 4638–4644.
12. Hasier G., Herrmann F. *Appl. Optics*, 1988, no. 22(27), pp. 4631–4637.
13. Gu F., Hung Y., Chen F. *Appl. Optics*, 1994, no. 3(33), pp. 5308–5317.
14. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Biomedical Engineering*, 2012, no. 3(46), pp. 109–111.
15. Zakhar'yevskiy A.N. *Interferometry* (Interferometers), Moscow, 1952, 296 p. (in Russ.)
16. Maiorov E.E., Udakhina S.V., Chernyak T.A., Prokopenko V.T., Tsygankova G.A. *Biomedical Engineering*, 2016, no. 2, pp. 84–87.
17. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.C., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D. *Measurement Techniques*, 2017, no. 10(60), pp. 1016–1021.

#### Data on authors

- |                             |   |  |
|-----------------------------|---|--|
| <b>Victor T. Prokopenko</b> | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Light Technology and Opto-Electronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru   |
| <b>Evgeny E. Maiorov</b>    | — | PhD, Associate Professor; University of the EurAsEC Inter-Parliamentary Assembly, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: majorov_ee@mail.ru                     |
| <b>Ludmila I. Shalamay</b>  | — | PhD, Associate Professor; Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: l.shalamay@mail.ru                       |
| <b>Marina V. Khokhlova</b>  | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Physics; E-mail: mvxox@mail.ru   |
| <b>Boris D. Katunin</b>     | — | PhD, Associate Professor; Naval Polytechnical Institute, Department of Physics; E-mail: bkatunin@mail.ru   |
| <b>Dmitry D. Kapralov</b>   | — | Post-Graduate Student; The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Design and Production of Electronic Means; E-mail: dmitry_kapralov@mail.ru |

**For citation:** Prokopenko V. T., Maiorov E. E., Shalamay L. I., Khokhlova M. V., Katunin B. D., Kapralov D. D. *in vivo* study of mineralized scurf under the gums using an interferometric device. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 7. P. 641–646 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-641-646