

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В НИЗКОКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ *in vivo* ДЕМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ ЭМАЛИ ПОД ДЕСНОЙ

В. Т. ПРОКОПЕНКО¹, Е. Е. МАЙОРОВ², Л. И. ШАЛАМАЙ³, М. В. ХОХЛОВА⁴,
М. С. ТУРОВСКАЯ², А. С. УШАКОВА⁵, А. В. ДАГАЕВ⁵

¹ Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

² Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС,
194044, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: majorov_ee@mail.ru

³ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова,
197022, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,
190103, Санкт-Петербург, Россия

Представлен низкокогерентный интерферометр сканирующего типа для томографических исследований в терапевтической стоматологии. Рассмотрены особенности низкокогерентной интерферометрии, которая является уникальным средством для определения и анализа *in vivo* деминерализованных областей эмали под десной. Показано, что при нормальном падении зондирующего излучения на глубинах от 2000 до 3000 мкм измерять деминерализацию эмали возможно с погрешностью не выше 2,1 мкм. Полученные томограммы позволяют обнаруживать *in vivo* деминерализацию эмали под десной на ранней стадии ее формирования.

Ключевые слова: когерентность, интерферометр Майкельсона, эмаль, деминерализация, длина волны излучения, резец, десна

Введение. С целью развития высокотехнологичных систем и приборов для медицины, в частности стоматологии, требуется совершенствовать методы и средства научной базы экспериментальных исследований. Важное место в решении указанной задачи занимают методы физической оптики [1—3]. Эти методы отличает, прежде всего, отсутствие непосредственного контакта с предметом исследования, а следовательно — возможность достижения достоверных результатов эксперимента [4—8].

Наиболее универсальны для исследований методы когерентной оптики, а именно когерентной сканирующей интерферометрии в низкокогерентном свете [9—12]. Системы и приборы, работающие на этих принципах, позволяют выполнять *in vivo* томографическое исследование деминерализованных областей эмали под десной.

Низкокогерентная интерферометрия является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных, ее уникальность обусловлена следующими возможностями:

- численное исследование статистических и динамических процессов;
- не предъявляются требования к качеству исследуемых объектов;
- может быть получена информация об исследуемом процессе как в количественном, так и качественном аспектах.

Поэтому целью работы являлось применение интерферометрии низкокогерентного света для определения и анализа *in vivo* деминерализованных областей эмали под десной.

Интерферометр с низкокогерентным источником излучения сканирующего типа.

В качестве источника излучения используется суперлюминесцентный диод с длиной волны $\lambda = 1,65$ мкм, длиной когерентности $l_c = 70$ мкм, мощностью излучения 10 мВт и диаметром пятна на поверхности $d = 70$ мкм. Прибор построен на основе интерферометра Майкельсона (рис. 1, 1 — источник излучения, 2, 6, 8 — объективы, 3 — светоделитель, 4 — контролируемый объект, 5 — опорное зеркало, 7 — диафрагма, 9 — камера), одно из зеркал которого заменено контролируемым объектом. В приборе предусмотрена возможность замены второго (опорного) зеркала диффузно отражающим объектом, выполняющим функции опорной поверхности. Находящийся на одинаковом расстоянии от источника фронт опорной волны R и фронт объектной волны R' проецируются в телевизионную камеру. Камера сфокусирована на фронт R' .

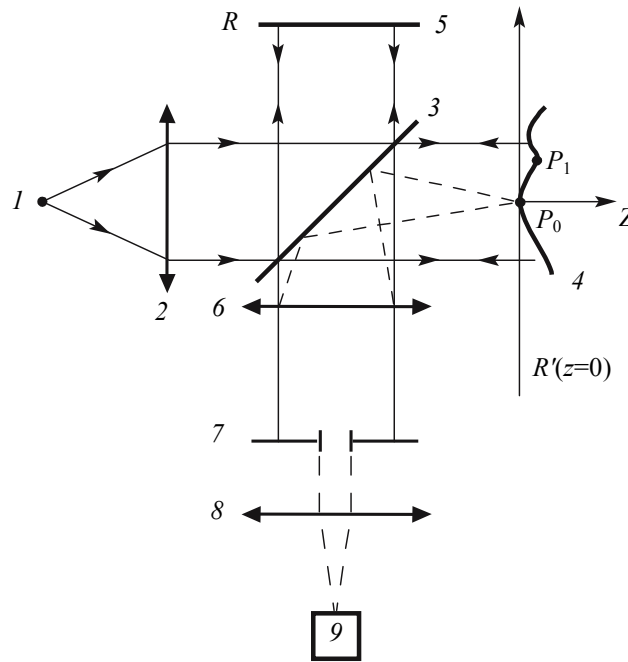


Рис. 1

На рис. 2 приведена визуально наблюдаемая деминерализованная область эмали под десной с наложенной на нее опорной волной. Видно, что контрастное интерференционное поле в виде картины спеклов [7, 13—15] локализовано вдоль оси $A - A'$. Размер этой области деминерализации объекта приблизительно соответствует, в пределах длины когерентности l_c , оптической длине плеч опорного и объектного каналов интерферометра.

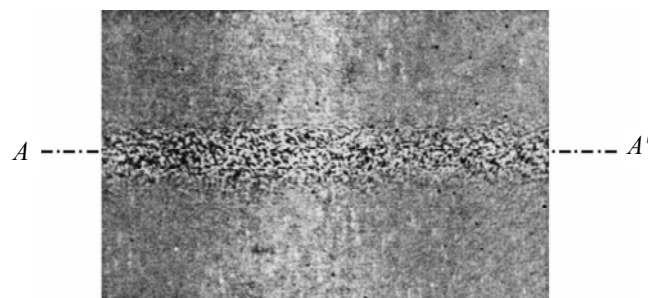


Рис. 2

Поскольку интерференционное поле представлено картиной спеклов, фаза которых меняется случайным образом, расчет фазовых характеристик теряет смысл [16—20]. Поэтому регистрируется лишь факт появления интерференционной картины вместо измерения фазы. Вследствие малой длины когерентности интерференция проявляется только для элементов

деминерализации объекта, расположенных близко к плоскости R' . Эта область изображения детектируется и запоминается в процессе перемещения объекта вдоль оси Z .

На рис. 3 представлена характерная кривая интенсивности интерференционного поля для точки P_0 (рис. 1) при смещении объекта вдоль оси Z . Интенсивность достигает максимума при $z = 0$, что соответствует равенству оптических длин плеч интерферометра. В точке P_1 , для которой $z = z_1$, кривая интенсивности смещается на z_1 . Для нахождения значения z_1 необходимо определить положение максимума огибающей интенсивности.

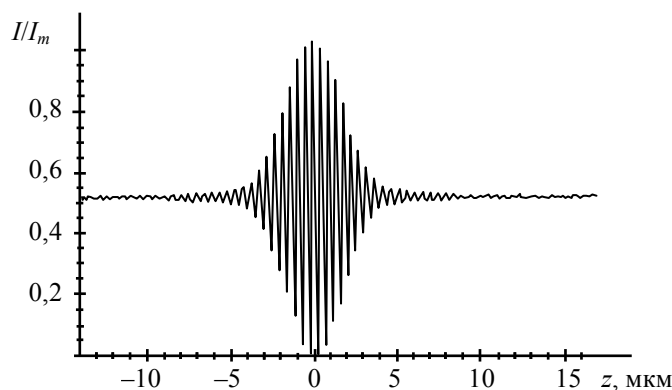


Рис. 3

В работе эта задача решается с помощью метода управляемого дискретного фазового сдвига опорной волны [4, 14]. На выходе интерферометра регистрируются три значения интерференционного сигнала I_1, I_2, I_3 , которые соответствуют трем значениям фазы φ : $0, 120^\circ, 240^\circ$. В работе такой фазовый сдвиг реализуется с помощью пьезокерамической подложки, на которой закреплено опорное зеркало интерферометра.

Амплитуда переменной составляющей интенсивности для каждой точки (x, y) находится согласно выражению [20—23]:

$$I_m(z_p) = \left(\sum_i (I_i - I_o)^2 \right)^{1/2},$$

где $I_o = \frac{1}{3} \sum_i I_i$ — среднее значение интенсивности.

После этого находится точка z_p , соответствующая максимуму огибающей.

Измерение *in vivo* деминерализованных областей эмали под десной. В работе представлены результаты измерения *in vivo* деминерализованных областей эмали в области верхнего (рис. 4, а), а также нижнего (рис. 4, б) (при отсутствии деминерализации эмали в области центрального 1 и бокового 2 резца; при наличии в области центрального 3 и бокового 4) резцов. Измерения проводились на интерферометре с низкокогерентным источником излучения, схема которого представлена на рис. 1. При динамических измерениях, к которым относятся измерения *in vivo*, необходимо обеспечить независимость результатов измерений от возможных смещений контролируемой области за время сканирования. С этой целью использован специальный блок прикусной, фиксирующий верхнечелюстную и нижнечелюстную арки.

Анализируемый участок поверхности десны 6×6 мм, глубина анализа составляла от 0 до 4 мм. Измерения проводились поточечно с частотой 46 Гц на 25 пациентах, имеющих деминерализованные области эмали, и на 25, не имеющих их. Представленные кривые получены в результате усреднения измерений в 4000 точках исследуемой области десны (рис. 4). Анализируемые участки десны (область центрального и бокового резцов) зондировались по нормали. Интерферометр функционировал в режиме сканирования. В этом случае модуляция разности хода интерферирующих волн (пучков) позволяет получить распределения амплитуды

отраженного сигнала по глубине подповерхностного слоя десны. Амплитуда интерференционного сигнала пропорциональна коэффициенту отражения нерассеянной компоненты от оптической неоднородности, положение которой определяется равенством длин плеч интерферометра. Таким образом, на рис. 4, а представлено распределение амплитуды отраженного сигнала при наличии в подповерхностном слое десны деминерализованных областей эмали у центрального и бокового резцов в верхнечелюстной арке, а на рис. 4, б — в нижнечелюстной арке у тех же резцов.

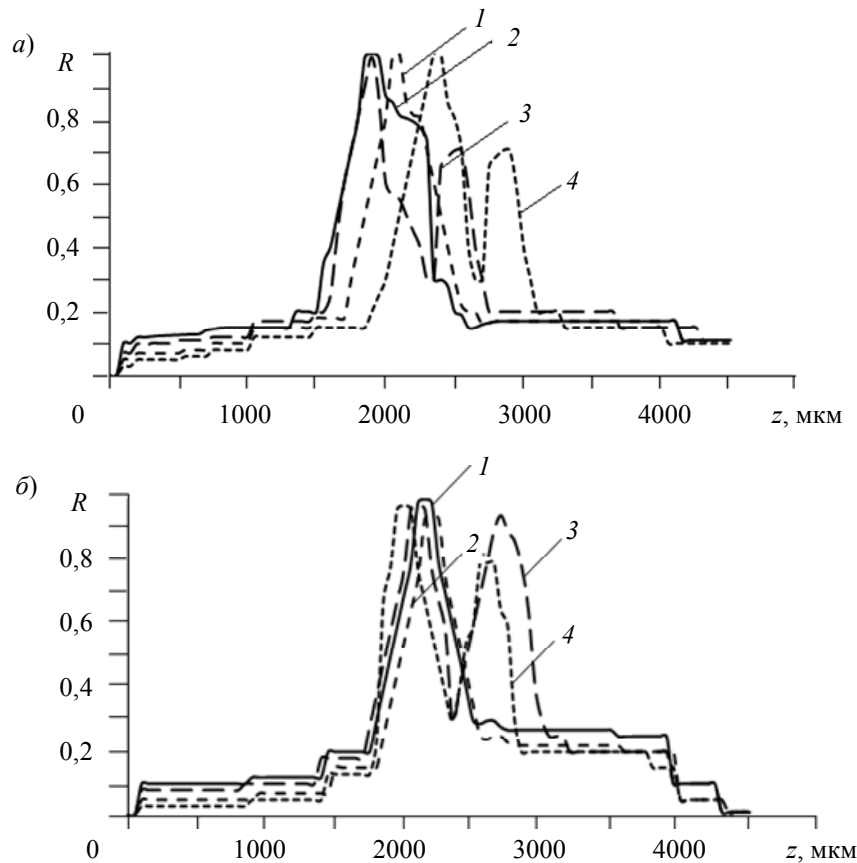


Рис. 4

Измерения проводились при следующих характеристиках прибора:

— погрешность измерений

$\sigma_z = (0,03 - 0,1) l_c$ — для $\theta = 0 - 30^\circ$,

$\sigma_z = (0,3 - 0,8) l_c$ — для $\theta = 45 - 60^\circ$,

— диапазон измерений — 0—4 мм;

— частота измерений — 46 Гц;

— среднее расстояние от оптической головки до объекта — 120 мм.

Заключение. В работе предложен интерференционный прибор для томографических измерений *in vivo* деминерализованных областей эмали под десной. Показано, что при нормальном падении зондирующего луча на контролируемую область эмали погрешность измерения не превышает 2,1 мкм. Результаты экспериментального исследования деминерализованных областей эмали под десной на глубине 2000—3000 мкм показывают, что целесообразно использовать прибор для томографических исследований в стоматологии. Полученные томограммы позволяют обнаруживать *in vivo* деминерализацию эмали под десной на ранней стадии ее формирования с точностью до 2,1 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dresel T., Hausler G., Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Appl. Optics. 1992. Vol. 31, N 7. P. 919—925.
2. Hasler G., Herrmann F. Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle // Appl. Optics. 1988. Vol. 27, N 22. P. 4631—4637.
3. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
4. Gu F., Hung Y., Chen F. Iteration algorithm for computer-aided speckle interferometry // Appl. Optics. 1994. Vol. 33, N 23. P. 5308—5317.
5. Gurov I. P., Gang L. Automatic inspection of non-smooth surface displacements by interferometer with low-coherent illumination // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2899. P. 230—239.
6. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
7. Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с франц. под ред. проф. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
8. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. 2012. № 7(145). С. 23—25.
9. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 13—16.
10. 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.
11. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 38—46.
12. Майоров Е. Е. Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 329—332.
13. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Sherstobitova A. S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // J. of Optical Technology. 2013. Vol. 80, N 3. P. 162—165.
14. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 193 с.
15. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306.
16. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. 2015. № 11(185). С. 26—31.
17. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А. Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 4. С. 61—66.
18. Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Черняк Т. А. Исследование интерферометра сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 32—40.
19. Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Пономарев С. Е. Разработка оптического прибора для обработки голографических интерферограмм применительно к локальным наклонам диффузно-отражающих объектов // Приборы. 2017. № 6. С. 25—28.
20. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Курлов А. В., Хохлова М. В., Кирик Д. И., Капранов Д. Д. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 33—37.

21. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Поликарпова А. А., Константинова А. А., Хохлова М. В. Исследование интерферометра Майкельсона с когерентно-ограниченным источником излучения для контроля диффузно отражающих объектов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 4. С. 387—397.
22. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Абрамян В. К., Хайдаров Г. Г., Хайдаров А. Г., Константинова А. А. Анализ интерференционного сигнала когерентно-ограниченной системы контроля негладких поверхностей // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. № 2. С. 221—233.
23. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Жаркова Т. В., Хохлова М. В., Писарева Е. А. Способ устранения погрешности продольной составляющей спекл-структуры при работе интерферометра Майкельсона // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 3. С. 167—172.

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 имени академика 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: mvxoh@mail.ru |
| Мария Сергеевна Туровская | — канд. экон. наук, доцент; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра экономики и финансов; E-mail: astral8@bk.ru |
| Анастасия Сергеевна Ушакова | — Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; старший специалист; E-mail: assolia_2810@mail.ru |
| Александр Владимирович Дагаев | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: adagaev@list.ru |

Поступила в редакцию
02.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Хохлова М. В., Туровская М. С., Ушакова А. С., Дагаев А. В. Применение сканирующей интерферометрии в низкокогерентном свете для измерения *in vivo* деминерализованных областей эмали под десной // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 128—135.

**APPLICATION OF SCANNING INTERFEROMETRY
OF LOW-COHERENCE LIGHT TO MEASURE DEMINERALIZED AREAS
OF THE ENAMEL UNDER THE GUM *in vivo***

**V. T. Prokopenko¹, E. E. Majorov², L. I. Shalamay³, M. V. Khokhlova⁴,
M. S. Turovskaya², A. S. Ushakova⁵, A. V. Dagaev⁵**

¹*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

²*University of the EurAsEC Inter-Parliamentary Assembly, 194044, St. Petersburg, Russia
E-mail: majorov_ee@mail.ru*

³*Pavlov First St. Petersburg State Medical University, 197022, St. Petersburg, Russia*

⁴*Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia*

⁵*St. Petersburg University of Management and Economics, 190103, St. Petersburg, Russia*

A low-coherence interferometer of scanning type for tomographic studies in therapeutic dentistry is presented. The features of low-coherence interferometry, which is a unique tool for the determination and analysis of demineralized areas of enamel under the gum *in vivo*, are considered. It is shown that at a normal incidence of probing radiation at depths from 2000 to 3000 μm , it is possible to measure enamel

demineralization with an error of not more than 2.1 μm . The obtained tomograms make it possible to detect *in vivo* demineralization of enamel under the gum at an early stage of its formation.

Keywords: coherence, Michelson interferometer, enamel, demineralization, radiation wavelength, cutter, gums

REFERENCES

1. Dresel T., Hausler G., Venzke H. *Appl. Optics*, 1992, no. 7(31), pp. 919–925.
2. Hasier G., Herrmann F. *Appl. Optics*, 1988, no. 22(27), pp. 4631–4637.
3. Zakhar'yevskiy A.N. *Interferometry* (Interferometers), Moscow, 1952, 296 p. (in Russ.)
4. Gu F., Hung Y., Chen F. *Appl. Optics*, 1994, no. 23(33), pp. 5308–5317.
5. Gurov I.P., Gang L. *Proc. SPIE*, 1996, no. 2899, pp. 230–239.
6. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296 p. (in Russ.)
7. Fracon M. *La Granularite Laser (Spekle) et ses Applications en Optique*, Paris, NY, Barcelona, Milan, Masson, 1978.
8. Majorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Instruments*, 2012, no. 7(145), pp. 23–25. (in Russ.)
9. Majorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 2((78), pp. 13–16. (in Russ.)
10. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Biomedical Engineering*, 2012, no. 3(46), pp. 109–111.
11. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2013, no. 2(23), pp. 38–46. (in Russ.)
12. Majorov E.E. *Scientific review*, 2013, no. 9, pp. 329–332. (in Russ.)
13. Majorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. *Journal of Optical Technology*, 2013, no. 3(80), pp. 162–165.
14. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh ob"ektov* (Interferometry of Diffusely Reflecting Objects), St. Petersburg, 2014, 193 p. (in Russ.)
15. Majorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*, 2014, no. 6(47), pp. 304–306.
16. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaydarov G.G., Chernyak T.A. *Instruments*, 2015, no. 11(185), pp. 26–31. (in Russ.)
17. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaydarov G.G., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2015, no. 4(25), pp. 61–66. (in Russ.)
18. Majorov E.E., Dagaev A.V., Ponomarev S.E., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2017, no. 2 (27), pp. 32–40. (in Russ.)
19. Majorov E.E., Dagaev A.V., Ponomarev S.E. *Instruments*, 2017, no. 6, pp. 25–28. (in Russ.)
20. Majorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D. *Measurement Techniques*, 2017, no. 10, pp. 33–37. (in Russ.)
21. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Polikarpova A.A., Konstantinova A.A., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 4, pp. 387–397. (in Russ.)
22. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abramyan V.K., Khaydarov G.G., Khaydarov A.G., Konstantinova A.A. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 2, pp. 221–233. (in Russ.)
23. Prokopenko V.T., Majorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Zharkova T.V., Khokhlova M.V., Pisareva E.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 3(61), pp. 167–172. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|---|
| Victor T. Prokopenko | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department Light Technology and Opoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru |
| Evgeny E. Majorov | — PhD, Associate Professor; University at the EurAsEC Inter-Parliamentary Assembly, Department of Mathematics and Information Technology; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Ludmila I. Shalamay | — PhD, Associate Professor; Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: l.shalamay@mail.ru |
| Marina V. Khokhlova | — PhD, Associate Professor; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Physics; E-mail: mvxox@mail.ru |
| Maria S. Turovskaya | — PhD, Associate Professor; University at the EurAsEC Inter-Parliamentary Assembly, Department of Economics and Finance; E-mail: astra18@bk.ru |
| Anastasiia S. Ushakova | — St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics; Senior Specialist; E-mail: assolia_2810@mail.ru |
| Alexander V. Dagaev | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics; E-mail: adagaev@list.ru |

For citation: Prokopenko V. T., Majorov E. E., Shalamay L. I., Khokhlova M. V., Turovskaya M. S., Ushakova A. S., Dagaev A. V. Application of scanning interferometry of low-coherence light to measure demineralized areas of the enamel under the gum *in vivo*. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 128—135 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-128-135