

## ИССЛЕДОВАНИЕ *in vivo* ЗУБНОЙ ЭМАЛИ ЧЕЛОВЕКА КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ ПРИБОРОМ

В. Т. ПРОКОПЕНКО<sup>1</sup>, Е. Е. МАЙОРОВ<sup>2</sup>, Л. И. ШАЛАМАЙ<sup>3</sup>, Н. Э. ПОПОВА<sup>2</sup>,  
Т. А. ЧЕРНЯК<sup>4</sup>, А. В. КУРЛОВ<sup>4</sup>, А. В. ДАГАЕВ<sup>5</sup>, Г. А. ЦЫГАНКОВА<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. академика И. П. Павлова,  
197022, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
190000, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,  
190103, Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup>Военно-морской политехнический институт, 196604, Пушкин, Россия

Разработан колориметрический прибор для измерения параметров цветности зубной эмали. Прибор может использоваться в терапевтической стоматологии. Представлена структурная схема колориметра и приведена графическая зависимость спектральной чувствительности приемной части прибора. Проанализированы метрологические возможности колориметра, а также получены результаты измерения аттестованным прибором. Результаты калибровки прибора и тестовых измерений координат цветности аттестованного и каталогизированного стекла показали, что колориметр может быть использован для контроля диффузно отражающих объектов, в частности, зубной эмали человека *in vivo* в разных состояниях (в норме и дефектном состоянии). Характеристики исследуемых образцов были определены вблизи маркированных точек, что подтверждает подлинность результатов.

**Ключевые слова:** колориметр, цветность, спектральная чувствительность, цветовой треугольник, зубная эмаль, стоматология

**Введение.** В настоящее время огромный интерес представляют медицинские оптические приборы и системы, в частности применяемые в терапевтической стоматологии. Особое значение имеют колориметрические приборы (в разном техническом исполнении) для измерения цветности диффузно отражающих объектов (ДОО). Оптические методы измерений цветности поверхности основаны на анализе светового излучения, прошедшего через контролируемый объект и отраженного от него. Анализ литературных данных показал, что наиболее перспективными в этом классе являются колориметрические приборы с трехэлементными RGB-фотодиодами. Это относительно новое направление в оптическом приборостроении интенсивно развивается лишь в последние годы. Приборы указанного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогами: упрощены их конструкция и необходимое регламентное техническое обслуживание, уменьшены массогабаритные характеристики датчика, стоимость изделия ниже стоимости зарубежных аналогов [1—3].

Поскольку стоматологу в большинстве случаев становится сложно определить дефект эмали на начальном уровне, необходимо применение колориметрического прибора с RGB-фотодиодом для определения параметров цвета (цветности) эмали.

**Колориметр с RGB-фотодиодом для измерения *in vivo* зубной эмали человека.** Структурная схема колориметра представлена на рис. 1. В осветителе использована галоген-

ная лампа накаливания мощностью 20 Вт с рабочим напряжением 12 В. Проходящее через образец или отраженное от него излучение передается на фотоприемник через волоконно-оптический жгут диаметром 4 мм. Диффузное отражение измеряется под углом 0—45° (стандарт General Electric). Использованный фотодетектор имеет высокую чувствительность в красной и ближней ИК-области спектра (рис. 2). Для подавления этой составляющей сигнала и формирования спектров фоточувствительности, приближенных к стандартным, в осветителе использован дополнительный оптический фильтр на основе сине-зеленого стекла (СЗС23). Электронная система сбора и обработки данных обеспечивает измерение уровня сигналов в каждом из трех оптических каналов, оцифровку этих сигналов и их усреднение.



Рис. 1

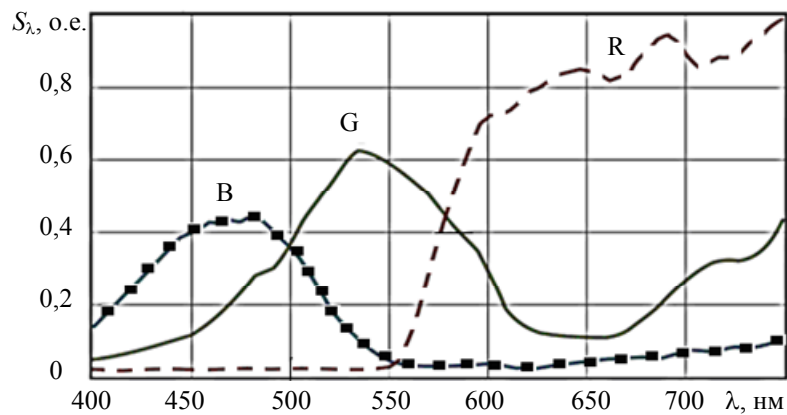


Рис. 2

Разработанное программное обеспечение позволяет выводить данные измерений в цифровом и графическом виде, а также сохранять их как текстовый файл [3—10]. Результаты измерений представляются на экране монитора тремя кругами красного, зеленого и синего цвета, яркость которых пропорциональна трем сигналам RGB-фотодетектора. Благодаря наложению этих кругов образуется цвет исследуемого образца. В графическом окне программы выводятся также величины сигналов с фотодетектора.

Помимо оптического отклика фотоприемника (см. рис. 2) три составляющие выходного сигнала возможно определить с помощью пропускания и отражения компонентов оптической системы, спектрального распределения энергии излучателя и цветовыми параметрами образца. Таким образом, для определения параметров цвета, близкого к цвету исследуемого объекта, необходимо выполнить калибровку датчика по эталону „белого“. При измерении пропускания в качестве такого эталона использован „свободный“ канал, а при измерении отражения — диффузный отражатель на основе молочного стекла МС22 с коэффициентом отражения по

всему цветовому диапазону спектра  $R = 0,952$ , аттестованный в ФГУ „ТЕСТ-С-Петербург“. Результаты измерений сохранялись программой, при этом в каждом из каналов регистрировался уровень сигнала. При следующем измерении в случае максимальной яркости (256 ед. в восьмиразрядном формате, принятом в системе RGB) наложение RGB формирует уровень „белого“.

Результаты измерений стоматологической эмали в нормальном и дефектном состоянии воспроизводятся в графической форме на пересечении R-, G-, B-кругов, а также сохраняются в программе приведенными к значениям в диапазоне от 0 до 1 (калибровка по „белому“ образцу). Всего выводится сорок строк, затем первая строка заменяется новой и т.д. Данные измерений по стоматологической эмали в норме и дефектном состоянии выводятся в разных столбцах, также можно сохранить информацию в текстовом файле.

Для анализа метрологических возможностей представленного прибора полученные результаты измерений сопоставлены с независимыми данными. В качестве объектов измерений использованы образцы каталогизированных цветных стекол [4] и специально изготовленные цветные диффузные отражатели на основе порошковых полимерных покрытий. Для стекол параметры цветности приведены в [4, 9]. Для диффузных отражателей эти параметры определялись здесь с использованием спектроколориметра, аналогичного рассмотренному в [5]. В обоих случаях (цветные стекла и диффузные отражатели) данные, использованные для сравнительного анализа и принимаемые за эталоны, представляли собой параметры цветности  $x, y, z$  в системе  $X, Y, Z$  для источника излучения [4—6]:

$$\begin{cases} x = X / (x + y + z); \\ y = Y / (x + y + z); \\ z = Z / (x + y + z), \end{cases} \quad (1)$$

где координаты цвета  $X, Y, Z$  определяются как интегралы по области спектра  $\lambda = 380—760$  нм:

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{760} \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Y = k \int_{380}^{760} \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Z = k \int_{380}^{760} \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ k = 100 / \int_{380}^{760} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \end{cases} \quad (2)$$

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  — функции удельных координат цвета,  $S(\lambda)$  — спектральное распределение энергии излучателя,  $\tau(\lambda)$  — спектральная зависимость коэффициента пропускания прозрачного образца (или  $\rho(\lambda)$  — отражения диффузного отражателя).

Для преобразования экспериментальных результатов, получаемых здесь в системе RGB, в систему  $X, Y, Z$  необходимо найти переходную матрицу  $3 \times 3$ :

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ G_1 & G_2 & G_3 \\ B_1 & B_2 & B_2 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (3)$$

Для определения элементов переходной матрицы использовались три образца цветных стекол или диффузных отражателей, координаты цветности  $x, y, z$  которых находились по

данным [4, 10] или в результате независимых измерений, а координаты цвета RGB — по результатам измерений их коэффициента пропускания или отражения.

Используя найденную переходную матрицу и данные колориметрического датчика, можно получить координаты цвета для других образцов.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Значения  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  преобразовывались в координаты цветности  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [6—8], после чего определялась метрологическая погрешность для этих образцов.

На рис. 3 приведены результаты калибровки колориметрического датчика: 1 — данные [4], 2, 3 — результаты измерений координат цветности цветных стекол. Для калибровки использованы стекла, координаты цветности которых располагались вблизи вершины треугольника красного (КС11), желто-зеленого (ЖЗС18) и синего стекла (СС2). На рис. 4 представлены результаты измерения средних значений цветности стоматологической эмали: 1 — маркеры, нормальное состояние верхних (2) и нижних (3) клыков, дефект верхних (4) и нижних (5) клыков.

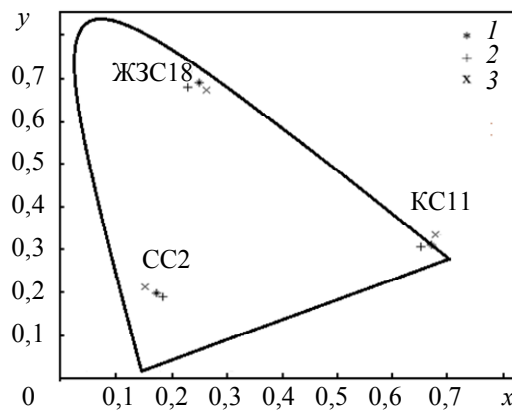


Рис. 3

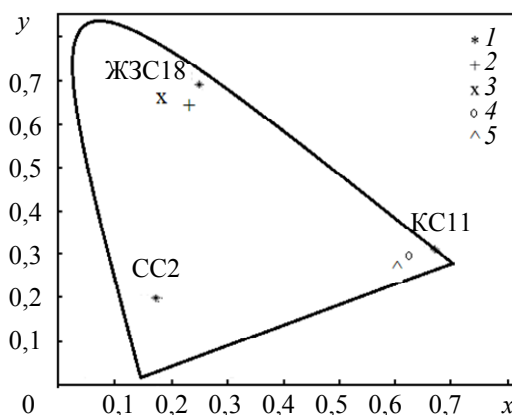


Рис. 4

Как видно, колориметрический датчик, использующий RGB-фотодиод, обеспечивает измерение параметров цветности прозрачных объектов на уровне визуально различимых оттенков цвета. Аналогичные результаты получены также для цветных диффузных отражателей [8, 10].

Измерения проводились на ста образцах, у пациентов примерно одного возраста (20—25 лет). Данные исследуемых образцов были получены вблизи маркированных точек, что подтверждает подлинность результатов измерений.

Измерения проводились при следующих характеристиках прибора:

Детектор .....	RGB-фотоэлементы
Диапазон отображения, %.....	0,01—160,00 (отражательная способность)
Источник света.....	Галогенная лампа накаливания
Время измерения, с.....	1
Минимальный интервал измерения, с .....	3
Производительность батареи, измерений..	800—1200
Область освещения, мм.....	8—11
Интерфейс / скорость .....	RS-232 совместимый (для обработки данных / PC) / Скорость передачи данных: 4800, 9600, 19200 б/с
Размеры (Ш×В×Г), мм .....	102×244×63
Вес, г .....	650
Рабочая температура/влажность.....	От 0 до +40 °С, относительная влажность не более 85 % без конденсации
Температура хранения/влажность .....	От –20 до +40 °С, относительная влажность не более 85 % без конденсации

**Заключение.** В работе предложен колориметрический прибор для цветовых измерений *in vivo* стоматологической эмали человека. Показано, что при контроле исследуемых образцов можно выявить дефект эмали. Экспериментальные результаты исследования *in vivo* эмали человека показали, что предложенный прибор актуален для исследований в терапевтической стоматологии. Полученные данные представляют огромную ценность для оптического приборостроения и медицины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юстова Е. Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб: Изд-во СПбГУ, 2000. 397 с. ISBN 5-288-02648-3.
2. Майоров Е. Е., Белов Н. П., Грисимов В. Н., Смирнов Ю. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д. Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода для определения параметров цвета диффузно отражающих объектов // *Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Perspektywiczne opracowania sa nauka I technikami—2011“*. 2011. Vol. 50. Fizyka: Pizemysl. Nauka I studia. С. 64—66.
3. Белов Н. П., Грисимов В. Н., Смирнов Ю. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д. Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56, № 3. С. 76—80.
4. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967. С. 63.
5. Белов Н. П., Яськов А. Д., Грисимов В. Н. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 7. С. 74—78.
6. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецкий. М.: Мир, 1978. 592 с.
7. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е., Хайдаров А. Г., Хайдаров Г. Г. Разработка колориметрического датчика с RGB-элементом и двухполосной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов // *Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та*. 2017. Вып. 48. № 20 (269). С. 107—115.
8. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Хохлова М. В., Курлов А. В., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Фадеев А. О. Возможность использования колориметра с RGB-компонентами для исследований фотооптического отбеливания, тонирования и окрашивания бумаги // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2017. № 3. С. 22—29.
9. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Sherstobitova A. S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // *Journal of Optical Technology*. 2013. Vol. 80, N 3. P. 162—165.
10. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб: Изд-во НИУ ИТМО, 2014. 193 с.

#### 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
- Наталья Эдуардовна Попова** — канд. педагог. наук; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий; E-mail: umougps@gmail.com
- Татьяна Анатольевна Черняк** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: 79119113039@yandex.ru
- Алексей Викторович Курлов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: alexeikurlov@gmail.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
- Галина Александровна Цыганкова** — канд. физ.-мат. наук; Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; преподаватель; E-mail galusinka@mail.ru

Поступила в редакцию  
17.10.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Попова Н. Э., Черняк Т. А., Курлов А. В., Дагаев А. В., Цыганкова Г. А. Исследование *in vivo* зубной эмали человека колориметрическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 372—378.

#### IN VIVO STUDY OF HUMAN TOOTH ENAMEL USING COLORIMETRIC DEVICE

V. T. Prokopenko<sup>1</sup>, E. E. Majorov<sup>2</sup>, L. I. Shalamay<sup>3</sup>, N. E. Popova<sup>2</sup>,  
T. A. Chernyak<sup>4</sup>, A. V. Kurlov<sup>4</sup>, A. V. Dagaev<sup>5</sup>, G. A. Tsygankova<sup>6</sup>

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

<sup>2</sup>University associated with IA EAES, 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>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 190000, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup>St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, 190103, St. Petersburg, Russia

<sup>6</sup>Naval Polytechnical Institute, 196604, Pushkin, St. Petersburg, Russia

A colorimetric device for measuring the color parameters of tooth enamel in normal and erosive state in therapeutic dentistry is developed. A block diagram of the colorimeter and the graphic representation of spectral sensitivity of the receiving part of the device are presented. Metrological capabilities of the developed colorimeter are analyzed with the use of results of measurement by a certified device. Results of carried out calibration of the colorimetric device and the data of test measurements of chromaticity coordinates of certified and cataloged glass show that the colorimeter can be used to control diffusely reflecting objects. In particular, the device can be used in therapeutic dentistry to examine *in vivo* human tooth enamel in various states. Characteristics of the test samples were determined near marked points to confirm the results authenticity.

**Keywords:** colorimeter, chromaticity, spectral sensitivity, color triangle, tooth enamel, dentistry

#### REFERENCES

1. Yustova E.N. *Tsvetovyye izmereniya (Kolorimetriya) (Color Measurements (Colorimetry))*, St. Petersburg, 2000, 397 p. ISBN 5-288-02648-3. (in Russ.)
2. Majorov E.E., Belov N.P., Grisimov V.N., Smirnov Yu.Yu., Sherstobitova A.S., Yaskov A.D. *Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Perspektywiczne opracowania sa nauka I techniki-2011"*, 2011, vol. 50, Fizyka: Pizemysl. Nauka I studia, pp. 64–66.
3. Belov N.P., Grisimov V.N., Smirnov Yu.Yu., Sherstobitova A.S., Yaskov A.D. *Journal of Instrument En-*

- gineering*, 2013, no. 3(56), pp. 76–80. (in Russ.)
4. *Katalog tsvetnogo stekla* (Colored Glass Catalog), Moscow, 1967, pp. 63. (in Russ.)
  5. Belov N.P., Yaskov A.D., Grisimov V.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 7(53), pp. 74–78. (in Russ.)
  6. Judd G.B. and Wyszecki G. *Color in Business, Science and Industry*, NY, Wiley, 1975.
  7. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abramyan V.K., Zaytsev Yu.E., Khaydarov A.G., Khaydarov G.G. *Belgorod State University Scientific Bulletin*, 2017, no. 20(269), pp. 107–115. (in Russ.)
  8. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khokhlova M.V., Kurlov A.V., Chernyak T.A., Dagayev A.V., Fadeyev A.O. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2017, no. 3, pp. 22–29. (in Russ.)
  9. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. *Journal of Optical Technology*, 2013, no. 3(80), pp. 162–165.
  10. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh ob"yektov* (Interferometry of Diffusely Reflecting Objects), St. Petersburg, 2014, 193 p. (in Russ.)

#### Data on authors

- |                             |                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Victor T. Prokopenko</b> | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Light Technologies and Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru                                                   |
| <b>Evgeny E. Majorov</b>    | — PhD, Associate Professor; University associated with IA EAES, 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>Natalia E. Popova</b>    | — PhD; University associated with IA EAES, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: umougps@gmail.com                                                    |
| <b>Tatyana A. Chernyak</b>  | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail 79119113039@yandex.ru          |
| <b>Alexey V. Kurlov</b>     | — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: alexeikurlov@gmail.ru   |
| <b>Alexander V. Dagaev</b>  | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: adagaev@list.ru |
| <b>Galina A. Tsygankova</b> | — PhD; Naval Polytechnical institute, Department of Physics; Lecturer; E-mail galusinka@mail.ru                                                                                 |

**For citation:** Prokopenko V. T., Majorov E. E., Shalamay L. I., Popova N. E., Chernyak T. A., Kurlov A. V., Dagaev A. V., Tsygankova G. A. *In vivo* study of human tooth enamel using colorimetric device. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 372–378 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-372-378