

---

---

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

---

---

УДК 543.421/.424

© Е. Е. Майоров, Т. А. Черняк, Г. А. Цыганкова, А. Ч. Машек,  
А. А. Константинова, Е. А. Писарева, 2020**СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТИЛЬНОГО  
ОПТИЧЕСКОГО ОТБЕЛИВАТЕЛЯ  
И ОРГАНИЧЕСКОГО КРАСИТЕЛЯ**

В настоящей работе показана востребованность и актуальность применения разработанного спектрофотометра для исследования оптического отбеливателя и органического красителя на разных тканях. В работе приведена структурная схема спектрофотометра и даны технико-эксплуатационные характеристики устройства. Получены спектры диффузного отражения для разных образцов тканей, на которых видно, что оптический отбеливатель формирует коротковолновую полосу поглощения при  $\lambda \leq 420$  нм и дает люминесцентную добавку к отраженному потоку излучения в синей области спектра  $\lambda \approx 430\text{--}480$  нм. В области  $\lambda \approx 500\text{--}640$  нм идет снижение коэффициента отражения. Проведено количественное сопоставление параметра яркости  $B$ , определенного из спектров  $R(\lambda)$  и по параметру яркости  $B$  белых тканей; результаты измерений  $B_c$  сведены к референтному значению  $B_r$  линейной интерполяцией. Погрешность интерполяции не превышала  $\delta B \leq 1\%$ . Измерены цветовые параметры для координат  $X, Y, Z$  с погрешностью не более 1%. Проанализированы спектры диффузного отражения окрашенных образцов тканей и получены результаты измерений колориметрических координат.

*Кл. сл.:* спектрометрия, RGB-компоненты, длина световой волны, коэффициент диффузного отражения, референтное значение, оптический отбеливатель, интерполяция

**ВВЕДЕНИЕ**

Спектрометрия как одно из направлений фотометрии представляет огромный интерес для различных областей науки и техники, таких как химия и химические производства, текстильная промышленность, пищевые технологии и производства, экология, медицина и биология [1]. Помимо лабораторных спектральных приборов различного применения, все большую востребованность приобретают промышленные спектрометры, устанавливаемые непосредственно в технологический поток и обеспечивающие online мониторинг технологического процесса по оптическим параметрам. В качестве примеров таких систем здесь можно привести спектральные приборы для нефтехимической, пищевой (производство сока) и медицинской областей [2].

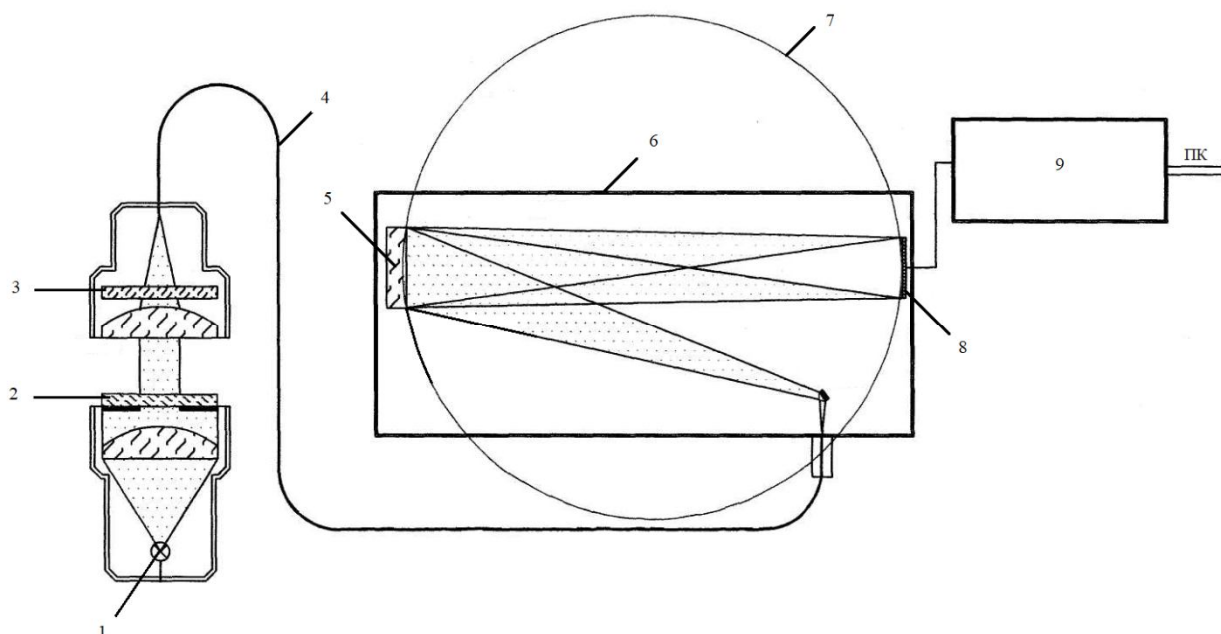
Большинство используемых в современной практике спектральных приборов и систем основываются на измерениях оптических спектров пропускания или (и) отражения в области длин волн  $\lambda = 380\text{--}760$  нм [3]. Совместное применение спектрального прибора с колориметрическим датчиком усложняет их конструкцию, увеличивает массогабаритные характеристики прибора или системы, а также приводит к возрастанию общей стоимости, которая порой становится недоступной отечественному потребителю [4].

Поэтому может представлять интерес разработанная экспериментальная установка, в состав которой входит спектрометр и колориметр с интегрирующей фотометрической сферой. В настоящее время на рынке появились отечественные оптоэлектронные компоненты, которые по своим техническим характеристикам обеспечивают измерения параметров цвета с высокой точностью. Особое внимание заслуживают RGB-компоненты, имеющие три фотоприемные площадки с оптическими фильтрами для выделения красной, зеленой и синей составляющей в регистрируемом излучении.

Цель работы — применение разработанной экспериментальной оптико-электронной системы для измерения оптических параметров текстильных отбеливателей и красителей.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Важным является практическое применение спектрофотометрии (в диапазоне длин волн 380–760 нм) и колориметрии (контроль параметров белизны (яркости)  $B$  и цветности) для текстильной промышленности, которая использует различные оптические отбеливатели и химические красители [6–11]. Одними из основных поставщиков в отечественную текстильную промышленность химических



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки:  
1 — RGB-светодиод; 2 — исследуемый образец; 3 — светофильтр СС6; 4 — оптическое волокно; 5 — дифракционная решетка; 6 — полихроматор; 7 — круг Роуланда; 8 — ПЗС-линейка; 9 — электронный блок; ПК — компьютер

реагентов, необходимых для производств, являются компания ПАО "Пигмент" и "Белатекс Сполка зоо". Данные компании для выходного контроля оптических параметров рекомендуют один из спектрометров — спектрометр YS-3060. Этот прибор имеет достаточно хорошую точность измерений 10 нм, обеспечен техническим сопровождением и поддержкой, но имеет высокую стоимость. Поэтому некоторые текстильные компании вынуждены были отказаться от его использования. А это означает, что заменяющая его разработка может представлять интерес для данной отрасли.

## СПЕКТРОФОТОМЕТР

Структурная схема спектрофотометра показана на рис. 1.

В устройстве использован полихроматор с вогнутой дифракционной решеткой классического типа ( $r = 125$  мм;  $N = 600$  штр./мм). Входная щель полихроматора (выходной торец полимерного оптоволоконного диаметра  $d = 0.6$  мм), дифракционная решетка и фотоприемник (линейка ПЗС) располагаются на круге Роуланда (диаметр  $d = 125$  мм). При этом линейный размер на фотоприемнике участка спектра  $\lambda = 380\text{--}760$  нм составляет 26.2 мм, что позволяет применять ПЗС линейку SONY ILX511.

В спектрофотометре можно устанавливать разные источники света (RGB-светодиоды с разными техническими характеристиками) для исследования коэффициента пропускания  $T(\lambda)$  прозрачных или рассеивающих объектов с индикатрисой в пределах угла  $120^\circ$ ; для исследования спектров диффузного отражения твердотельных образцов. RGB-светодиоды используют одно и то же оптоволоконно для подключения к полихроматору, так что какой-либо дополнительной настройки при замене одного на другой не требуется.

Электронный блок сбора и обработки данных и специально разработанная программа обеспечивают вывод и хранение результатов измерений в виде графиков и числовых массивов в области длин волн 380–760 нм с шагом  $\lambda = 2$  нм.

Для выравнивания распределения потока излучения по длинам волн, а также снижения уровня рассеянного излучения в полихроматоре в разных RGB-светодиодах устройства использован оптический фильтр на основе цветного стекла СС6, существенно подавляющий длинноволновую составляющую светового потока при  $\lambda \geq 600$  нм.

Технико-эксплуатационные характеристики системы:

- рабочий спектральный диапазон — 380–760 нм;

- предел спектрального разрешения —  
не хуже 2 нм;
- погрешность калибровки шкалы длин волн —  
не хуже 0.2 нм;
- погрешность измерения коэффициента отражения — не хуже 0.05 %;
- время регистрации одного спектра — 20 мс;
- при автоматической регистрации спектра —  
30 мс;
- питание от сети — 220 В, 50 Гц;
- передача данных через порт — RS 232;
- габаритные размеры — 400 × 250 × 180 мм.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались текстильные изделия из хлопка 70 % и полиэфира 30 %; вискозы 70 % и полиэфира 30 %; льна 70 % и полиэфира 30 %. Данные объекты исследования подвергались обработке оптическим отбеливателем "Белатекс ЕС" с разной концентрацией. Образцы окрашивались органическим красителем — хризифенином также разной концентрации.

Объекты исследования были предоставлены компанией "Промткань", г. Иваново, вместе с информацией по координатам цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и параметру  $B$ , полученной на спектрофотометре YS-3060. Предоставленные значения были приняты за референтные.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Отбеливание

Оптический отбеливатель в исследуемых образцах ("Белатекс ЕС") придает высокую степень белизны, что улучшает эстетическое восприятие качества текстильных изделий. Для исследования спектров диффузного отражения использовались образцы белых тканей, предоставленные компанией "Промткань", г. Иваново, и аттестованные на спектрофотометре YS-3060 по параметру белизны  $B$  и координатам цвета в колориметрической системе  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . В качестве отбеливателя применялся "Белатекс ЕС" с концентрацией в исходной массе 0.2 и 0.6 %.

Измеренные спектры диффузного отражения для девяти образцов, предоставленных в наше распоряжение, показаны на рис. 2. Результаты измерений координат цвета и параметра яркости, полученные на спектрофотометре YS-3060 и разработанном, сопоставлены в табл. 1.

Спектры диффузного отражения воспроизводят особенности, обусловленные отбеливанием тканей. Оптический отбеливатель формирует коротковолновую полосу поглощения при  $\lambda \leq 420$  нм и дает люминесцентную добавку к отраженному

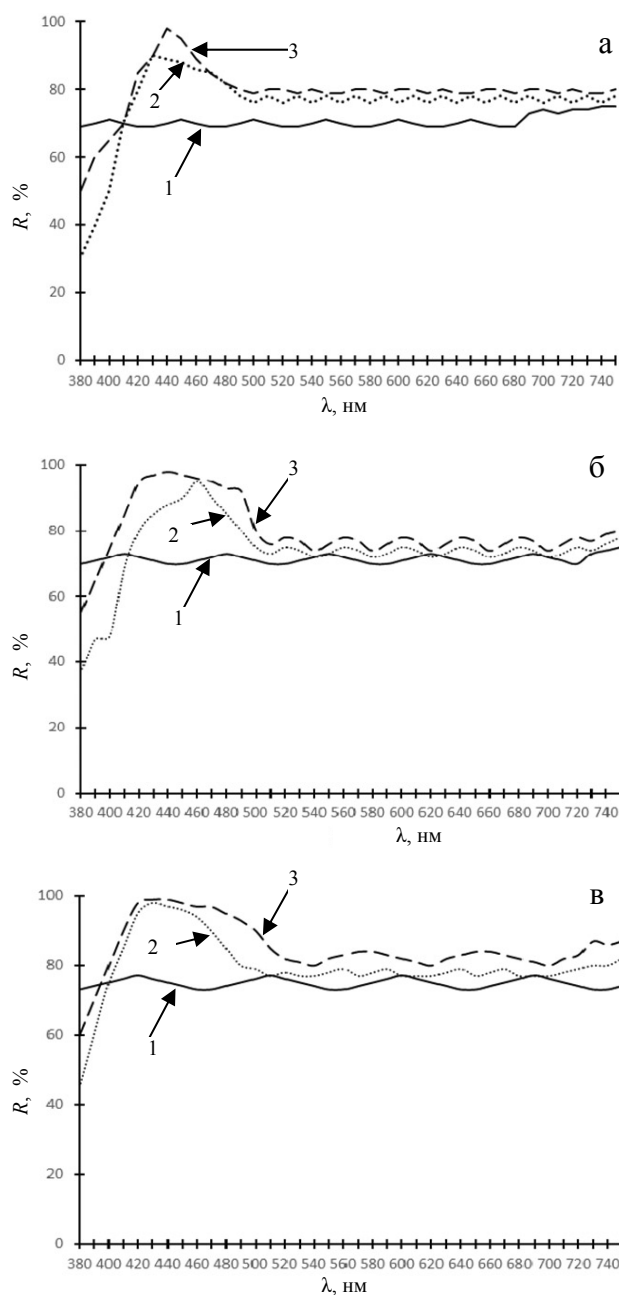


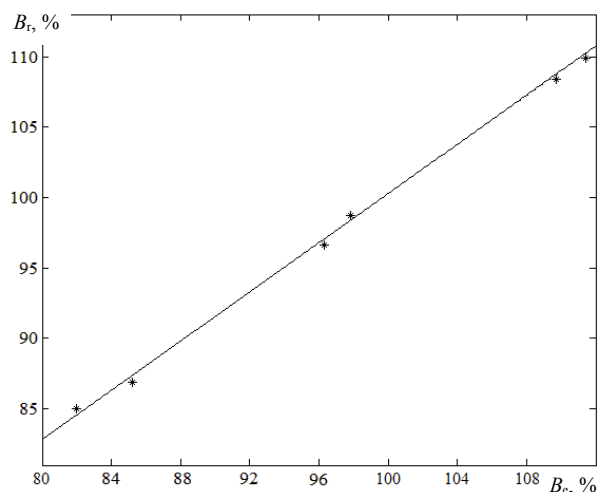
Рис. 2. Спектры диффузного отражения образцов белой ткани.

а — хлопок 70 % и полиэфир 30 %; б — вискоза 70 % и полиэфир 30 %; в — лен 70 % и полиэфир 30 %; 1 — без оптического отбеливателя; 2 — с концентрацией 0.2 %; 3 — с концентрацией 0.6 %

поток излучения в синей области спектра  $\lambda \approx 430-480$  нм. Далее идет снижение коэффициента отражения в средней области видимого диапазона при  $\lambda \approx 500-640$  нм. Количественное сопоставление параметра яркости  $B$ , определенного из спектров  $R(\lambda)$  (рис. 2), а также на разработанном

**Табл. 1.** Сопоставление результатов измерений координат цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и яркости  $B$  на YS-3060 и на разработанном спектрофотометре

Оптический отбеливатель	Референтные данные спектрофотометра YS-3060				Данные экспериментального спектрофотометра			
	$X$	$Y$	$Z$	$B$	$X$	$Y$	$Z$	$B$
Белатекс ЕС, 0 % (лен 70 %, полиэфир 30 %)	87.23	91.94	93.88	87.8	86.9	91.1	92.3	86.15
Белатекс ЕС, 0.2 % (лен 70 %, полиэфир 30 %)	91.73	94.57	117.03	107.8	91.5	93.7	118.2	106.1
Белатекс ЕС, 0.6 % (лен 70 %, полиэфир 30 %)	92.38	95.08	120.17	110.9	91.9	94.1	119.0	109.5
Белатекс ЕС, 0 % (вискоза 70 %, полиэфир 30 %)	81.16	85.24	92.54	86.6	81.0	85.0	93.1	87.75
Белатекс ЕС, 0.2 % (вискоза 70 %, полиэфир 30 %)	85.74	87.82	115.37	106.2	86.0	88.7	116.0	105.2
Белатекс ЕС, 0.6 % (вискоза 70 %, полиэфир 30 %)	86.20	88.31	118.44	109.3	86.9	89.0	119.0	110.5
Белатекс ЕС, 0 % (хлопок 70 %, полиэфир 30 %)	77.90	81.47	91.67	85.10	78.7	81.0	92.2	84.6
Белатекс ЕС, 0.2 % (хлопок 70 %, полиэфир 30 %)	82.24	83.96	113.44	104.4	81.5	84.6	114.0	105.0
Белатекс ЕС, 0.6 % (хлопок 70 %, полиэфир 30 %)	82.89	84.37	117.07	107.9	83.5	85.7	118.0	107.0



**Рис. 3.** Сходимость измеренного параметра белизны  $B_e$  и его референтного значения  $B_r$ . \* — эксперимент, линия — расчет

спектрофотометре, и его референтное значение, измеренное на спектрофотометре YS-3060, представлено на рис. 3.

По сравнению с референтными данными  $B_r$  результаты проведенных измерений  $B_e$  занижены, что связано с различием ультрафиолетовой составляющей в спектре использованного здесь RGB-светодиода по сравнению с импульсным ксеноновым источником спектрофотометра YS-3060. Это подтверждается также измерениями цветовых параметров, т.к. координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  получены с погрешностью не более 1 %.

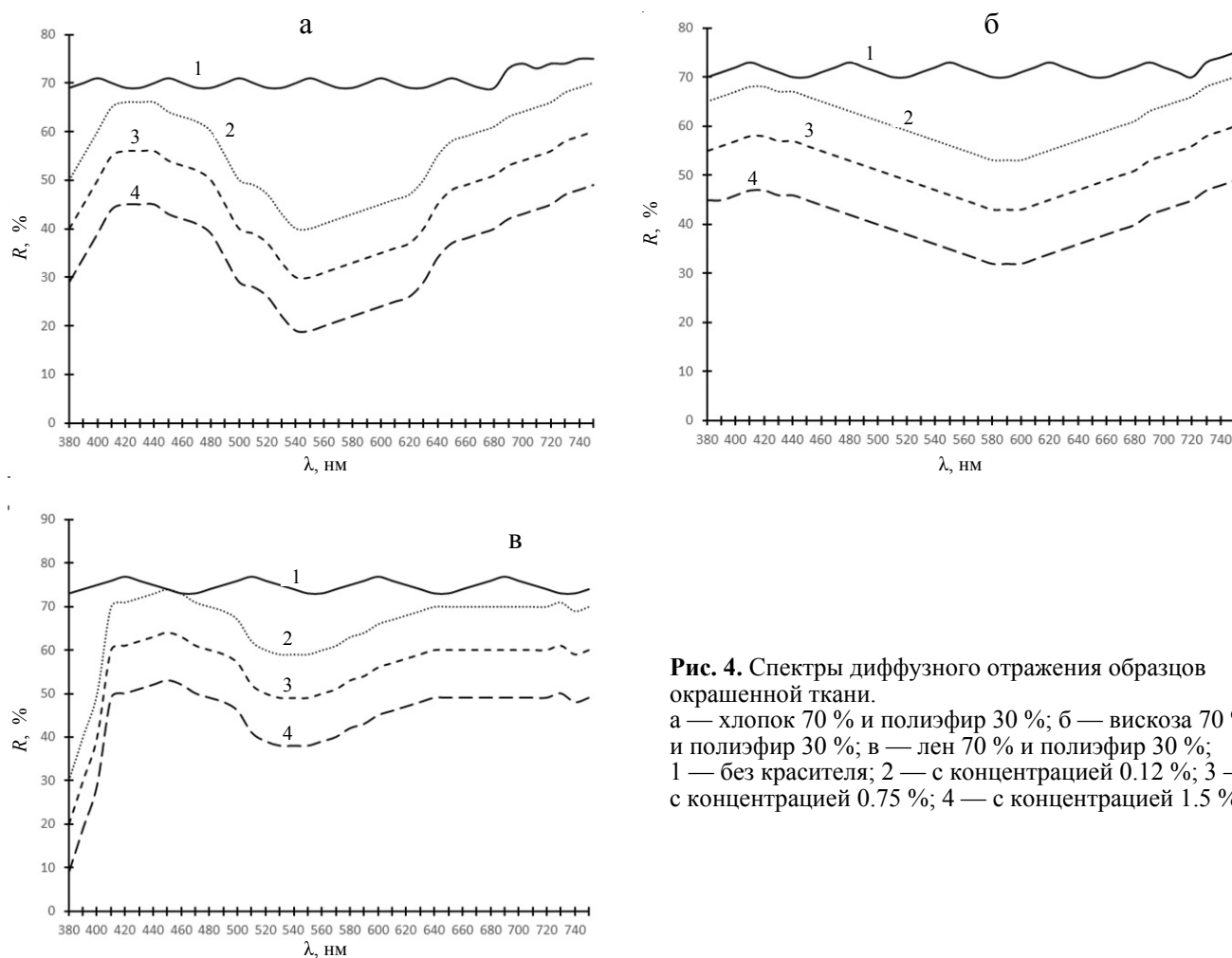
Как показывают данные на рис. 3 по параметру яркости  $B$  белых тканей, результаты измерений  $B_e$  могут быть приведены к референтному значению  $B_r$  линейной интерполяцией. Интерполяционное выражение выглядит следующим образом:

$$B_r = 1.7452 \cdot B_e - 60.287.$$

Погрешность интерполяции не превышает  $\delta B \leq 1$  %, что удовлетворяет требованиям контроля технологических процессов отбеливания.

### Окрашивание

При окрашивании использовались те же материалы, что и при отбеливании. Спектры диффузного отражения окрашенных образцов даны на рис. 4. Применялся органический краситель —



**Рис. 4.** Спектры диффузного отражения образцов окрашенной ткани.  
 а — хлопок 70 % и полиэфир 30 %; б — вискоза 70 % и полиэфир 30 %; в — лен 70 % и полиэфир 30 %;  
 1 — без красителя; 2 — с концентрацией 0.12 %; 3 — с концентрацией 0.75 %; 4 — с концентрацией 1.5 %

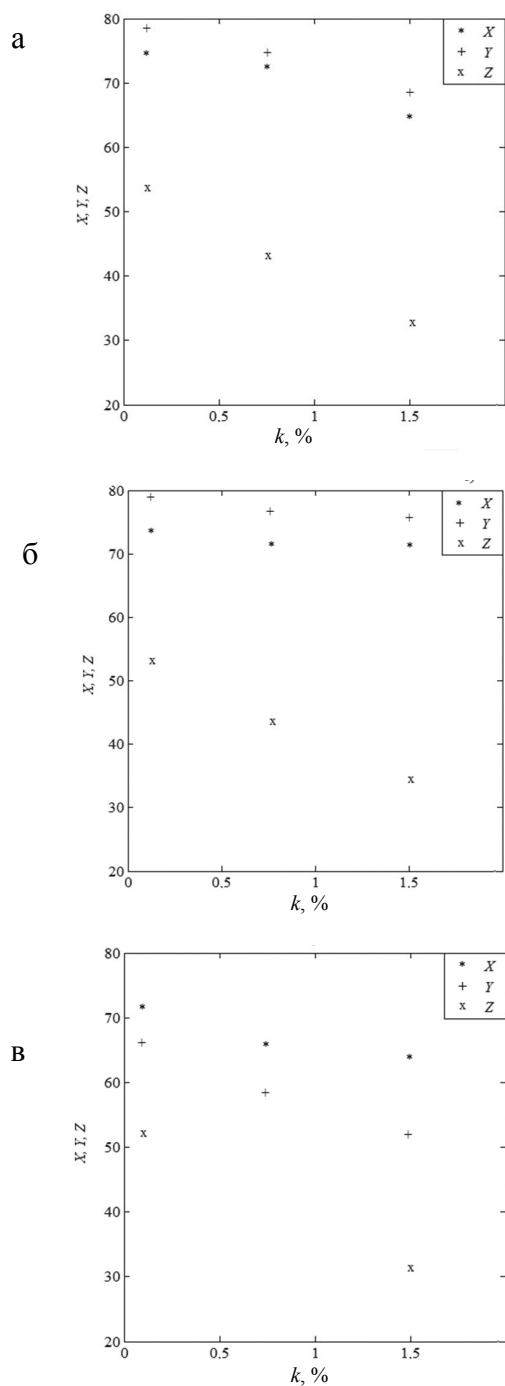
**Табл. 2.** Сравнение колориметрических измерений на YS-3060 и на разработанном спектрофотометре

Краситель	Концентрация ( $k$ , %)	Референтные данные спектрофотометра YS-3060			Данные экспериментального спектрофотометра		
		$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$
Хризофенин (лен 70 %, полиэфир 30 %)	0.12	75.0	79.0	54.8	74.8	78.9	54.6
	0.75	72.0	75.5	43.1	71.9	75.4	43.1
	1.5	64.9	67.7	31.1	64.9	67.9	31.1
Хризофенин (вискоза 70 %, полиэфир 30 %)	0.12	74.7	79.0	53.0	74.7	79.0	53.5
	0.75	71.8	77.2	42.5	71.9	77.5	42.4
	1.5	71.0	75.4	33.6	71.5	75.2	33.5
Хризофенин (хлопок 70 %, полиэфир 30 %)	0.12	71.8	66.0	52.3	71.8	66.5	52.1
	0.75	66.4	58.2	40.7	66.6	58.4	40.4
	1.5	63.0	52.6	31.9	63.0	51.6	31.7

хризофенин с концентрацией 0.12, 0.75 и 1.5 %. Референтные данные по координатам цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  были получены на спектрофотометре YS-3060. Для проверки прибора использовались образцы, также предоставленные компанией "Промткань",

г. Иваново, вместе с референтными координатами цвета. Результаты измерений колориметрических координат сведены в табл. 2.

Зависимости этих координат от концентрации красителя, полученные в настоящей работе, практически



**Рис. 5.** Зависимость координат цвета от концентрации красителя.  
 а — хлопок 70 % и полиэфир 30 %;  
 б — вискоза 70 % и полиэфир 30 %;  
 в — лен 70 % и полиэфир 30 %

точно соответствовали референтным данным. Для образцов, окрашенных хризофенином, эти зависимости приведены на рис. 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный экспериментальный спектрофотометр полностью удовлетворяет требованиям текстильной промышленности при контроле процессов окрашивания ткани. Он может быть также использован для контроля оптического отбеливания белых образцов тканей.

Представляет интерес разработка на основе представляемого экспериментального спектрофотометра промышленного спектрофотометра, устанавливаемого непосредственно в технологический цикл для обеспечения мониторинга процессов отбеливания и окрашивания тканей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
2. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1950. 268 с.
3. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.
4. Ganz E. Whiteness measurement // J. of Color and Appearance. 1972. Vol. 1, no. 5. P. 33–41.
5. Thielert R., Schliemann G. Visual impression of whiteness and its colorimetric definition // J. of Opt. Soc. Am. 1973. Vol. 63. P. 1607–1612.
6. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб.: Издательство СПбГУ, 2000. 397 с.
7. Malacara-Hernandez D. Color vision and colorimetry: theory and applications. SPIE, 2002. 176 p. URL: <https://www.spie.org/Publications/Book/422835?SSO=1>
8. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Абрамян В.К., Зайцев Ю.Е. Разработка лабораторного спектрофотометра видимой области спектра для контроля жидкофазных сред // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 8. С. 42–46. URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/15438>
9. 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. URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/16076>

10. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Абрамян Г.А., Зайцев Ю.Е., Хайдаров А.Г., Хайдаров Г.Г., Дагаев А.В., Пономарев С.Е. Разработка колориметрического датчика с RGB-элементом и двухполосной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов // Приборы. 2017. № 6. С. 25–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29459833>
11. 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 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 4. С. 373–379. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-372-378

**Военно-морской политехнический институт,  
г. Пушкин (Цыганкова Г.А., Машек А.Ч.)**

**Военная академия связи им. С.М. Буденного,  
Санкт-Петербург (Константинова А.А.)**

**Михайловская военная артиллерийская академия,  
Санкт-Петербург (Писарева Е.А.)**

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,  
majorov\_ee@mail.ru

**Санкт-Петербургский университет технологий  
управления и экономики (Майоров Е.Е.)**

**Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического приборостроения  
(ГУАП) (Черняк Т.А.)**

Материал поступил в редакцию 23.11.2020

## SPECTRAL STUDIES OF TEXTILE OPTICAL BLEACH AND ORGANIC DYE

**E. E. Maiorov<sup>1</sup>, T. A. Chernyak<sup>2</sup>, G. A. Tsygankova<sup>3</sup>,  
A. C. Mashek<sup>3</sup>, A. A. Konstantinova<sup>4</sup>, E. A. Pisareva<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Saint Petersburg University of Management Technologies and Economics, Russia*

<sup>2</sup>*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Russia*

<sup>3</sup>*The naval Polytechnic Institute, Pushkin, Russia*

<sup>4</sup>*Military Academy of Telecommunications named. S.M. Budyonny, Saint Petersburg, Russia*

<sup>5</sup>*Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia*

This paper shows the relevance of the developed spectrophotometer for the study of optical bleach and organic dye for different tissues. The paper presents a block diagram of the spectrophotometer and provides technical and operational characteristics of the device. Diffuse reflection spectra were obtained for different tissue samples, which show that the optical bleach forms a short-wave absorption band at  $\lambda \leq 420$  nm and gives a luminescent additive to the reflected radiation flux in the blue region of the spectrum  $\lambda \approx 430$ – $480$  nm. In the region of  $\lambda \approx 500$ – $640$  nm, the reflection coefficient decreases. A quantitative comparison of the brightness parameter  $B$  determined from the  $R(\lambda)$  spectra and the brightness parameter  $B$  of the white tissues was performed. The results of  $B_e$  measurements were reduced to the reference value  $B_r$  by linear interpolation. The interpolation error did not exceed  $\delta B \leq 1$  %. The color parameters for the  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  coordinates were measured with an error of no more than 1 %. The diffuse reflection spectra of colored tissue samples are analyzed and the results of measurements of colorimetric coordinates are obtained.

**Keywords:** spectrometry, RGB components, light wavelength, diffuse reflection coefficient, reference value, optical bleach, interpolation

## INTRODUCTION

Spectrometry as one of the areas of photometry is of great interest for various fields of science and technology, such as chemistry and chemical production, textile industry, food technology and production, ecology, medicine and biology [1]. In addition to laboratory spectral instruments for various applications, industrial spectrometers, installed directly into the process flow and providing online monitoring of the technological process by optical parameters, are becoming more and more in demand. Spectral instruments for the petrochemical, food (juice production) and medical fields can be cited as examples of such systems [2].

Most of the spectral devices and systems used in modern practice are based on measurements of optical transmission and / or reflection spectra in the wavelength range  $\lambda = 380\text{--}760$  nm [3]. The combined use of a spectral device with a colorimetric sensor complicates their design, increases the weight and size characteristics of the device or system, and also leads to an increase in the total cost, which sometimes becomes inaccessible to the domestic consumer [4].

Therefore, the developed experimental setup may be of interest, which includes a spectrometer and a colorimeter with an integrating photometric sphere. At present, domestic opto-electronic components have appeared on the market, which, according to their

technical characteristics, provide measurements of color parameters with high accuracy. Special attention should be paid to RGB components, which have three photo-receiving areas with optical filters to separate the red, green and blue components in the registered radiation.

The purpose of this work is to use the developed experimental optoelectronic system for measuring the optical parameters of textile bleachers and dyes.

## FORMULATION OF THE PROBLEM

Practical application of spectrophotometry (in the wavelength range 380–760 nm) and colorimetry (control of whiteness (brightness)  $B$  and chromaticity parameters) is important for the textile industry, which uses various optical bleachers and chemical dyes [6–11]. Pigment PJSC and Belatex Sp. z o.o. are among the main suppliers of chemical reagents required for production to the domestic textile industry. The company's data for the output control of optical parameters recommend one of the spectrometers — the YS-3060 spectrometer. This device has a fairly good measurement accuracy of 10 nm, is provided with technical support, but has a high cost. Therefore, some textile companies were forced to refuse its use. And this

**Fig: 1.** Block diagram of the experimental setup.

1 — RGB LED; 2 — test sample; 3 — CC6 light filter; 4 — optical fiber; 5 — diffraction grating; 6 — polychromator; 7 — Rowland circle; 8 — linear CCD; 9 — electronic unit; ПК — PC

means that the development replacing it may be of interest for this industry.

## SPECTROPHOTOMETER

The block diagram of the spectrophotometer is shown in Fig. 1.

The device uses a classical type polychromator with a concave diffraction grating ( $r = 125$  mm;  $N = 600$  lines / mm). The entrance slit of the polychromator (the exit end of the polymer fiber with a diameter of  $d = 0.6$  mm), the diffraction grating and the photodetector (linear CCD) are located on the Rowland circle (diameter  $d = 125$  mm). In this case, the linear size of the spectral region  $\lambda = 380\text{--}760$  nm on the photodetector is 26.2 mm, which allows the use of the SONY ILX511 linear CCD.

The spectrophotometer can be equipped with different light sources (RGB LEDs with different technical characteristics) to study the transmittance  $T(\lambda)$  of

transparent or scattering objects with an indicatrix within an angle of  $120^\circ$ ; for studying diffuse reflectance spectra of solid samples. RGB LEDs use the same fiber to connect to the polychromator, so no additional setup is required to replace one with the other.

Electronic unit for data collection and processing and a specially developed program provide output and storage of measurement results in the form of graphs and numerical arrays in the wavelength range of 380–760 nm with steps  $\lambda = 2$  nm.

To equalize the distribution of the radiation flux by wavelengths, as well as to reduce the level of scattered radiation in the polychromator, in different RGB LEDs of the device, an optical filter based on colored glass CC6 was used, which significantly suppresses the long-wave component of the light flux at  $\lambda \geq 600$  nm.

Technical and operational characteristics of the system:

– operating spectral range — 380–760 nm;



- spectral resolution limit — not worse than 2 nm;
- wavelength scale calibration error — not worse than 0.2 nm;
- measurement error of the reflection coefficient — no worse than 0.05 %;
- registration time of one spectrum — 20 ms;
- with automatic spectrum registration — 30 ms;
- mains power supply — 220 V, 50 Hz;
- data transmission through the port — RS 232;
- overall dimensions — 400 × 250 × 180 mm.

**Fig. 2.** Diffuse reflectance spectra of white tissue samples.

a — cotton 70 % and polyester 30 %; б — viscose 70 % and polyester 30 %; в — flax 70 % and polyester 30 %; 1 — without optical bleacher; 2 — with a concentration of 0.2 %; 3 — with a concentration of 0.6 %

The objects of research were provided by the Promtkan company, Ivanovo, together with information on the  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  color coordinates and the  $B$  parameter, obtained on a YS-3060 spectrophotometer. The provided values were taken as reference ones.

## EXPERIMENTAL RESULTS

### Whitening

Optical bleacher in the test samples ("Belatex EC") imparts a high degree of whiteness, which improves the aesthetic perception of the quality of textile products. To study the diffuse reflectance spectra, we used samples of white fabrics provided by the Promtkan company, Ivanovo, and certified with the of a spectrophotometer YS-3060 according to the whiteness parameter  $B$  and the color coordinates  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  in the colorimetric system. Belatex EC was used as a bleacher with a concentration of 0.2 and 0.6 % in the initial mass.

The measured diffuse reflectance spectra for nine samples provided to us are shown in Fig. 2. The results of measurements of the coordinates of the color and the brightness parameter, obtained on the spectrophotometer YS-3060 and the developed one, are compared in Tab. 1.

Diffuse reflectance spectra reproduce the characteristics associated with tissue bleaching. Optical bleacher forms a short-wave absorption band at  $\lambda \leq 420$  nm and gives a luminescent additive to the reflected radiation flux in the blue region of the spectrum  $\lambda \approx 430$ –480 nm. Further, the reflection coefficient decreases in the middle region of the visible range at  $\lambda \approx 500$ –640 nm. A quantitative comparison of the brightness parameter  $B$  determined from the spectra  $R(\lambda)$  (Fig. 2), as well as on the developed

## OBJECTS OF STUDY

Investigated textiles were made of cotton 70 % and polyester 30 %; viscose 70 % and polyester 30%; flax 70 % and polyester 30 %. These objects of research were treated with Belatex EC optical bleacher with different concentrations. The samples were dyed with an organic dye chrysofenin, also of different concentrations.

spectrophotometer, and its reference value measured on the YS-3060 spectrophotometer, are shown in Fig. 3.

In comparison with the  $B_r$  reference data, the results of the measurements of  $B_e$  are downplayed due to the difference in the ultraviolet component in the spectrum of the RGB LED used here compared to the pulsed xenon source of the YS-3060 spectrophotometer. This is also confirmed by measurements of color parameters, since  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  coordinates were received with an error of no more than 1 %.

As the data in Fig. 3 for the brightness parameter  $B$  of white tissues show, the results of  $B_e$  measurements can be reduced to the reference value  $B_r$  by linear interpolation. The interpolation expression looks like this:

$$B_r = 1.7452 \cdot B_e - 60.287.$$

The interpolation error does not exceed  $\delta B \leq 1$  %, which meets the requirements for monitoring technological bleaching processes.

### Coloration

The same materials were used for dyeing as for bleaching. The diffuse reflectance spectra of colored samples are shown in Fig. 4. The organic dye, chrysofenine, was used with a concentration of 0.12, 0.75 and 1.5 %. Reference data for the color coordinates  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  were obtained on a YS-3060 spectrophotometer. To verify the device, we used samples also provided by the Promtkan company, Ivanovo, together with the reference color coordinates. The results of measurements of colorimetric coordinates are summarized in table 2.

**Tab. 1.** Comparison of the results of measurements of color coordinates  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  and brightness  $B$  on the YS-3060 and on the developed spectrophotometer

Optical bleacher	YS-3060 spectrophotometer reference data				Experimental spectrophotometer data			
	$X$	$Y$	$Z$	$B$	$X$	$Y$	$Z$	$B$
Belatex EC, 0 % (flax 70 %, polyester 30 %)	87.23	91.94	93.88	87.8	86.9	91.1	92.3	86.15
Belatex EC, 0.2 % (flax 70 %, polyester 30 %)	91.73	94.57	117.03	107.8	91.5	93.7	118.2	106.1
Belatex EC, 0.6 % (flax 70 %, polyester 30 %)	92.38	95.08	120.17	110.9	91.9	94.1	119.0	109.5
Belatex EC, 0 % (viscose 70 %, polyester 30 %)	81.16	85.24	92.54	86.6	81.0	85.0	93.1	87.75
Belatex EC, 0.2 % (viscose 70 %, polyester 30 %)	85.74	87.82	115.37	106.2	86.0	88.7	116.0	105.2
Belatex EC, 0.6 % (viscose 70 %, polyester 30 %)	86.20	88.31	118.44	109.3	86.9	89.0	119.0	110.5
Belatex EC, 0 % (cotton 70 %, polyester 30 %)	77.90	81.47	91.67	85.10	78.7	81.0	92.2	84.6
Belatex EC, 0.2 % (cotton 70 %, polyester 30 %)	82.24	83.96	113.44	104.4	81.5	84.6	114.0	105.0
Belatex EC, 0.6 % (cotton 70 %, polyester 30 %)	82.89	84.37	117.07	107.9	83.5	85.7	118.0	107.0

**Fig. 3.** The convergence of the measured whiteness parameter  $B_e$  and its reference value  $B_r$ .

\* — experiment, line — calculation

**Fig. 4.** Diffuse reflectance spectra of dyed fabric samples.

a — cotton 70 % and polyester 30 %; б — viscose 70 % and polyester 30 %; в — flax 70 % and polyester 30 %;

1 — without dye; 2 — with a concentration of 0.12 %;

3 — with a concentration of 0.75 %; 4 — with a concentration of 1.5 %

**Tab. 2.** Comparison of colorimetric measurements on the YS-3060 and on the developed spectrophotometer

Dye	Concentration ( $k$ , %)	YS-3060 spectrophotometer reference data			Experimental spectrophotometer data		
		$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$
Chrysophenine (flax 70 %, polyester 30 %)	0.12	75.0	79.0	54.8	74.8	78.9	54.6
	0.75	72.0	75.5	43.1	71.9	75.4	43.1
	1.5	64.9	67.7	31.1	64.9	67.9	31.1
Chrysophenine (viscose 70 %, polyester 30 %)	0.12	74.7	79.0	53.0	74.7	79.0	53.5
	0.75	71.8	77.2	42.5	71.9	77.5	42.4
	1.5	71.0	75.4	33.6	71.5	75.2	33.5
Chrysophenine (cotton 70 %, polyester 30 %)	0.12	71.8	66.0	52.3	71.8	66.5	52.1
	0.75	66.4	58.2	40.7	66.6	58.4	40.4
	1.5	63.0	52.6	31.9	63.0	51.6	31.7

**Fig. 5.** Dependence of color coordinates on the concentration of the dye.

- a — cotton 70 % and polyester 30 %;  
 б — viscose 70 % and polyester 30 %;  
 в — flax 70 % and polyester 30 %

The dependences of these coordinates on the dye concentration obtained in this work are practically exactly matched the reference data. For samples dyed with chrysofenine, these dependences are shown in Fig. 5.

### CONCLUSION

Thus, the developed experimental spectrophotometer fully meets the requirements of the textile industry when controlling the processes of dyeing fabric. It can also be used to control the optical bleaching of white tissue samples.

It is of interest to develop an industrial spectrophotometer based on the presented experimental spectrophotometer to be installed directly into the technological cycle to ensure monitoring of the processes of bleaching and dyeing of fabrics.

### REFERENCES

1. Ajzenberg Yu.B., ed. *Spravochnaya kniga po svetotekhnike* [Light Engineering Reference Book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 472 p. (In Russ.).
2. Gurevich M.M. *Cvet i ego izmerenie* [Color and its measurement]. Moscow – Leningrad, Akademiya nauk SSSR Publ., 1950. 268 p. (In Russ.).
3. Dzhadd D., Vyshecki G. *Cvet v nauke i tekhnike* [Color in Science and Technology]. Moscow, Mir Publ., 1978. 592 p. (In Russ.).
4. Ganz E. Whiteness measurement. *J. of Color and Appearance*, 1972, vol. 1, no. 5, pp. 33–41.
5. Thielert R., Schliemann G. Visual impression of whiteness and its colorimetric definition. *J. of Opt. Soc. Am.*, 1973, vol. 63, pp. 1607–1612.  
DOI: 10.1364/JOSA.63.001607
6. Yustova E.N. *Cvetovye izmereniya (Kolorimetriya)* [Color measurements (Colorimetry)]. St. Petersburg State University Publ., 2000. 397 p. (In Russ.).
7. Malacara-Hernandez D. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. SPIE, 2002. 176 p. URL: <https://www.spie.org/Publications/Book/422835?SSO=1>
8. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Khaidarov A.G., Zaitsev U.E., Abrahamyan V.K. [Development of a laboratory spectrophotometer for the visible spectrum for the control of liquid-phase environments]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2016, no. 8, pp. 42–46. URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/15438> (In Russ.).
9. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khokhlova M.V., Kurlov A.V., Fadeev A.O. [The ability to use the colorimeter with the RGB components for research photooptical bleaching, toning and dyeing the paper]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2017, no. 3, pp. 22–29.  
URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/16076> (In Russ.).
10. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abrahamyan G.A., Zaitsev U.E., Khaidarov A.G., Khaidarov G.G., Dagaev A.V., Ponomarev S.E. [Development of optical device for processing of holographic interferogram with respect to the local gradient of the diffuse – reflective objects]. *Pribory* [Instruments], 2017, no. 6, pp. 25–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29459833> (In Russ.).
11. Prokopenko V.T., Maiorov 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]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2019, vol. 62, no. 4, pp. 373–379. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-372-378 (In Russ.).

Contacts: *Mayorov Evgeniy Evgen'evich*,  
 majorov\_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 23.11.2020