

# МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGEJ. ЧАСТЬ 8. МЕТОДИКА БЕСПРИБОРНОЙ ОЦЕНКИ ЦВЕТА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ШКАЛЫ ASTM D 1500

**В.К. Корнеева,**

*доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**В.М. Капцевич,**

*зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**В.В. Остриков,**

*преподаватель-стажер каф. технологии металлов БГАТУ*

**Е.Е. Пернач,**

*студент факультета технического сервиса в АПК БГАТУ*

**И.С. Королец,**

*студент факультета технического сервиса в АПК БГАТУ*

*Предложен и реализован сквозной аналитический алгоритм преобразования абстрактных хроматических координат системы RGB USC балльной шкалы ASTM D 1500 в международное цифровое пространство sRGB через промежуточные системы CIE xyY и CIE XYZ. Для автоматизации измерений в среде ImageJ разработан программный макрос ASTM-OilColor\_Analyzer. Идентификация цвета пробы нефтепродукта осуществляется по критерию минимизации евклидова цветового расстояния  $\Delta E_{RGB}$  между экспериментальными координатами и эталонной цифровой sRGB-матрицей. Разработанная методика характеризуется низкими аппаратными требованиями и высокой скоростью анализа, что делает ее эффективным инженерным инструментом для экспресс-тестирования нефтепродуктов непосредственно в условиях организаций АПК.*

*Ключевые слова: нефтепродукты, экспресс-диагностика, колориметрия, шкала ASTM D 1500, цветное пространство sRGB, ImageJ, макрос.*

*A comprehensive analytical algorithm has been proposed and implemented to transform abstract chromatic coordinates from the RGB USC scale of the ASTM D 1500 point system into the international digital sRGB space via the intermediate CIE xyY and CIE XYZ systems. To automate measurements in the ImageJ environment, the ASTM-OilColor\_Analyzer software macro has been developed. Motor oil sample color identification is performed based on the criterion of minimizing the Euclidean color distance  $\Delta E_{RGB}$  between the experimental coordinates and the reference sRGB digital matrix. The developed method is characterized by low hardware requirements and high analysis speed, making it an effective engineering tool for express testing of motor oil directly in agricultural facilities.*

*Keywords: motor oil, express diagnostics, colorimetry, ASTM D 1500 scale, sRGB color space, ImageJ, macro.*

## Введение

Эффективность и надежность эксплуатации автотракторной техники в агропромышленном комплексе зависят от качества используемых нефтепродуктов, которые в процессе работы ДВС подвергаются интенсивному термическому, механическому и химическому воздействию, что приводит к их посте-

пенному старению и деградации [1]. Одним из ключевых, информативных и оперативно фиксируемых индикаторов состояния нефтепродуктов является их цвет [2]. По изменению цвета нефтепродукта можно судить о степени термоокислительной деструкции его базовой основы, накоплении дисперсных примесей (сажи, нагара), продуктов износа трущихся деталей,

попадании пыли и воды, а также об истощении пакета функциональных присадок.

Одним из простых и доступных методов оценки цвета нефтепродуктов является их оценка по балльной цветовой шкале *ASTM D 1500* [3, 4], который базируется на визуальном сравнении цвета образца с цветом набора 16 эталонных стандартных цветных стекол с использованием специализированных приборов – колориметров, например, ЦНТ (РФ), Цвет-ПХП (РФ), *Koehler Instrument K13290* (США), *Huazheng Electric HZSD-29* (КНР) и др. Такие приборы, имеющие высокую стоимость, позволяют проводить оценку цвета нефтепродукта только в лабораторных условиях. Кроме того, проводимая визуальная оценка цвета из-за индивидуальных особенностей человеческого зрения и изменчивости условий освещения может характеризоваться высокой погрешностью и низкой воспроизводимостью результатов. В связи с этим актуальной научно-производственной задачей является цифровизация контроля и создание доступной, объективной и бесприборной экспресс-методики оценки цвета нефтепродуктов.

Современный уровень развития цифровой техники и алгоритмов компьютерного зрения открывает широкие перспективы для использования мобильных устройств и свободно распространяемого программного обеспечения, в частности программного комплекса *ImageJ* [5], для оперативного контроля цветных характеристик нефтепродуктов. Однако прямое использование цифровых изображений затруднено в связи с тем, что исходные спектральные характеристики эталонов *ASTM D 1500*, зафиксированные в абстрактных координатах системы *RGB USC* [4] и не являющиеся координатами цифрового цветового пространства, не могут быть использованы для визуализации и воспроизведения эталонных цветов на цифровых устройствах. В то же время, международный стандарт *sRGB* [6], разработанный для отображения цветов на экранах, в интернете и печати, может быть использован для цифровизации шкалы *ASTM D 1500*. Такая цифровая шкала может служить основой для разработки новой методики экспресс-оценки цвета нефтепродукта.

Целью работы является построение цифровой версии шкалы *ASTM D 1500* в пространстве *sRGB* и разработка на ее основе бесприборной автоматизированной методики экспресс-оценки цвета нефтепродуктов с использованием программного комплекса *ImageJ*.

### Основная часть

**Построение цифровой версии шкалы *ASTM D 1500*.** Для построения цифровой версии шкалы *ASTM D 1500* (для отображения на экране или в пе-

чатных материалах) авторами предложено преобразовать значения координат системы *RGB USC* из стандарта [4] в координаты цветового пространства *sRGB*.

В таблице 1 [4] для каждого цвета шкалы (0,5-8,0) представлены значения координат  $R_M$ ,  $G_M$  и  $B_M$  в системе *RGB USC* и значения светового коэффициента пропускания  $T_w$ .

**Таблица 1. Координаты  $R_M$ ,  $G_M$  и  $B_M$  в системе *RGB USC* и световой коэффициент пропускания  $T_w$**

Цвет по ASTM	Координаты цветности (система <i>RGB USC</i> )			Световой коэффициент пропускания (стандартный источник света C CIE) $T_w$
	красный $R_M$	зеленый $G_M$	синий $B_M$	
0,5	0,462	0,473	0,065	0,86 ± 0,06
1,0	0,489	0,475	0,036	0,77 ± 0,06
1,5	0,521	0,464	0,015	0,67 ± 0,06
2,0	0,552	0,442	0,006	0,55 ± 0,06
2,5	0,582	0,416	0,002	0,44 ± 0,04
3,0	0,611	0,388	0,001	0,31 ± 0,04
3,5	0,640	0,359	0,001	0,22 ± 0,04
4,0	0,671	0,328	0,001	0,152 ± 0,022
4,5	0,703	0,296	0,000	0,109 ± 0,016
5,0	0,736	0,264	0,000	0,081 ± 0,012
5,5	0,770	0,230	0,000	0,058 ± 0,010
6,0	0,805	0,195	0,000	0,040 ± 0,008
6,5	0,841	0,159	0,000	0,026 ± 0,006
7,0	0,877	0,123	0,000	0,016 ± 0,004
7,5	0,915	0,085	0,000	0,0081 ± 0,0016
8,0	0,956	0,044	0,000	0,0025 ± 0,0006

Координаты  $R_M$ ,  $G_M$  и  $B_M$  в системе *RGB USC* представляют собой абстрактные хроматические координаты в треугольнике Максвелла [7], в котором выполняется условие:

$$R_M + G_M + B_M = 1.$$

Эти координаты представляют собой относительные доли воображаемых первичных цветов и не являются цифровыми значениями интенсивности каждого цвета в диапазоне [0, 255], как в пространстве *sRGB*. Световой коэффициент пропускания  $T_w$  характеризует фотопическое светопропускание эталонных цветных стекол шкалы *ASTM D 1500* при освещении стандартным источником света *CIE Standard Source C* [8]. Таким образом, данные таблицы 1 напрямую не связаны с пространством *sRGB* и не могут быть интерпретированы как цифровые цвета.

Для корректного построения цифрового изображения шкалы *ASTM D 1500* авторами предложен алгоритм преобразования *RGB USC* в *sRGB* по следующей схеме:

$$RGB USC \rightarrow CIE xyY \rightarrow CIE XYZ \rightarrow sRGB.$$

Такой порядок действий позволяет абстрактные координаты *RGB USC* перевести в систему *CIE xyY*, совместимую с международным стандартом *CIE 1931* [8], далее преобразовать ее в пространство *CIE XYZ*, являющееся универсальной опорной моделью для всех современных цветовых пространств, и осуществить заключительный переход в пространство *sRGB*, обеспечивающее корректное воспроизведение цветов на экране и в печати в соответствии с международным стандартом *IEC 61966-2-1:1999* [6].

Предложенный алгоритм преобразования выполнялся следующим образом.

$RGB USC \rightarrow CIE xyY$ . Такое преобразование основано на том, что координаты  $R_M$ ,  $G_M$  и  $B_M$  в системе  $RGB USC$  эквивалентны координатам цветности  $x$  и  $y$  в системе  $CIE xyY$ , а параметр  $T_w$  напрямую интерпретируется как  $Y$  (яркость). Таким образом, переход в  $xyY$ , являющийся единственным корректным способом связать данные  $ASTM$  с международной цветиметрической системой, был выполнен с помощью следующих преобразований [8]:

$$x = \frac{R}{R+G+B}; y = \frac{G}{R+G+B}; Y = T_w.$$

Так, например, для цвета 2,0 по  $ASTM D 1500$ :  $x = 0,552$ ;  $y = 0,442$ ;  $Y = 0,55$ .

$CIE xyY \rightarrow CIE XYZ$ . Это преобразование выполнялось с использованием стандартных выражений [8]:

$$X = \frac{x}{y}Y; Z = \frac{1-x-y}{y}Y; Y = T_w.$$

Так, например, для цвета 2,0 по  $ASTM D 1500$ :  $X = 0,6869$ ;  $Y = 0,55$ ;  $Z = 0,0075$ .

$CIE XYZ \rightarrow sRGB$ . При осуществлении данного преобразования было учтено, что цифровое пространство  $sRGB$  имеет два уровня представления: линейное и гамма-корректированное.

Линейные значения  $sRGB$ , которые пропорциональны энергетическим характеристикам излучения – интенсивности света, используются для корректных вычислений: моделирования цветосмещения, статистической обработки или пересчета в другие цветовые пространства. Для перевода значений  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в линейные значения  $R_{lin}$ ,  $G_{lin}$  и  $B_{lin}$  использовали стандартную матрицу  $IEC 61966-2-1:1999$  [6]:

$$\begin{pmatrix} R_{lin} \\ G_{lin} \\ B_{lin} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,2406 & -1,5372 & -0,4986 \\ -0,9689 & 1,8758 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,2040 & 1,0570 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

Так, например, для цвета 2,0 по  $ASTM D 1500$ :  $R_{lin} = 1,3767$ ;  $G_{lin} = 0,3665$ ;  $B_{lin} = -0,0661$ .

Гамма-корректированные значения  $sRGB$  – это значения  $R$ ,  $G$  и  $B$ , полученные из соответствующих линейных значений путем применения стандартной кусочно-линейной гамма-функции, определенной в  $IEC 61966-2-1:1999$  [6]. Такая коррекция моделирует нелинейную чувствительность человеческого зрения к яркости и обеспечивает согласованное воспроизведение цветов на экранах и устройствах вывода изображений. Гамма-коррекция выполняется по формулам:

$$C' = \begin{cases} 12,92C_{lin} & \text{при } C_{lin} \leq 0,0031308; \\ 1,055C_{lin}^{1/24} - 0,055 & \text{при } C_{lin} > 0,0031308, \end{cases}$$

где  $C_{lin}$  – линейное значение  $R_{lin}$ ,  $G_{lin}$  или  $B_{lin}$ , а  $C'$  – гамма-корректированное значение.

Так, например, для цвета 2,0 по  $ASTM D 1500$ :  $R = 1,1503$ ;  $G = 0,6394$ ;  $B = -0,8534$ .

Полученные значения  $sRGB$ , как линейные, так и гамма-корректированные, являются математически корректными промежуточными результатами. Однако в цифровой реализации стандарта  $IEC 61966-2-1:1999$  допускаются только координаты со значениями в диапазоне  $[0; 1]$ , поэтому для практического использования осуществляется ограничение их значений путем обрезки за пределами допустимого интервала. Тогда для цвета 2,0 по  $ASTM D 1500$ :  $R_{lin} = 1,0$ ;  $G_{lin} = 0,3665$ ;  $B_{lin} = 0$ ;  $R = 1,0$ ;  $G = 0,6394$ ;  $B = 0$ , или в 8-битном представлении:  $R_{lin} = 255$ ;  $G_{lin} = 93$ ;  $B_{lin} = 0$ ;  $R = 255$ ;  $G = 163$ ;  $B = 0$ .

В таблице 2 представлены расчетные линейные значения  $sRGB$  цветовой шкалы  $ASTM D 1500$ .

Полученные линейные значения  $sRGB$  (табл. 2), помимо их использования для пересчета в другие

Таблица 2. Линейные значения  $sRGB ASTM D 1500$

Балл ASTM	$R_{lin}$	$G_{lin}$	$B_{lin}$	Балл ASTM	$R_{lin}$	$G_{lin}$	$B_{lin}$
0,5	255	205	0	4,5	171	0	0
1	255	173	0	5	155	0	0
1,5	255	135	0	5,5	138	0	0
2	255	93	0	6	121	0	0
2,5	255	58	0	6,5	103	0	1
3	255	28	0	7	88	0	1
3,5	238	8	0	7,5	69	0	1
4	197	0	0	8	44	0	1

цветовые пространства, например,  $CIE XYZ$ ,  $CIE Lab$ ,  $HSB$  и др. для количественной оценки оттенка, насыщенности и цветовых различий, могут быть применимы при моделировании процессов светопротекания и окрашивания нефтепродукта, что расширяет возможности интерпретации физических механизмов изменения цвета.

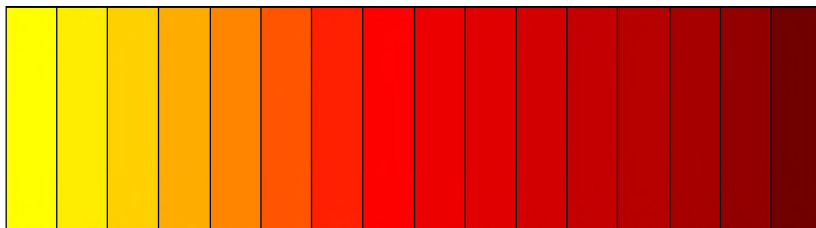
Цифровое изображение цветовой шкалы  $ASTM D 1500$ , полученное по рассчитанным гамма-корректированным значениям  $sRGB$  (табл. 3), представлено на рисунке 1.

**Разработка бесприборной методики оценки цвета нефтепродуктов с использованием программы ImageJ.** На основе построенной цифровой версии шкалы  $ASTM D 1500$  была разработана экспресс-методика автоматизированной оценки цвета нефтепродуктов в среде *ImageJ*.

Для обеспечения точности и воспроизводимости результатов автоматизированного анализа необходимо минимизировать влияние внешнего освещения на регистрируемый цвет пробы. Съемка исследуемых проб должна осуществляться при стандартизованных условиях: использование рассеянного белого

**Таблица 3. Гамма-корректированные значения  
*sRGB* ASTM D 1500**

Балл ASTM	R	G	B	Балл ASTM	R	G	B
0,5	255	232	0	4,5	214	0	0
1	255	215	0	5	205	0	0
1,5	255	192	0	5,5	194	0	0
2	255	163	0	6	183	0	3
2,5	255	132	0	6,5	171	0	8
3	255	93	0	7	159	0	10
3,5	247	51	0	7,5	142	0	11
4	228	0	0	8	115	0	8



0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 6,5 7,0 7,5 8,0

Рисунок 1. Цифровое изображение цветовой шкалы ASTM D 1500

освещения (желательно приближенного к стандартному источнику света *CIE*); расположение объектива цифровой камеры строго перпендикулярно поверхности пробы для исключения геометрических

искажений и световых бликов; наличие в кадре тестового белого эталона для последующей программной корректировки баланса белого при наличии отклонений в условиях съемки.

Для минимизации ошибок и ускорения проведения экспресс-анализа разработанный колориметрический алгоритм сопоставления цвета цифрового изображения исследуемого нефтепродукта с цифровой шкалой *ASTM D 1500* был автоматизирован путем написания макроса *ASTM-OilColor\_Analyzer* в среде *ImageJ* (рис. 2).

Автоматизированный алгоритм работы программы включает в себя следующие последовательные этапы: интерактивное выделение зоны интереса (*ROI*); преобразование выделенной области в цветовой стек (*RGB Stack*); бесконтактное считывание среднего арифметического значения яркости отдельно для красного  $R_{экс}$ ,

зеленого  $G_{экс}$  и синего  $B_{экс}$  каналов. На основе полученных экспериментальных цветовых координат рас-

```

File Edit Language Templates Run Tools Window Options Help  ASTM-OilColor_Analyzer.ijm
Outline < ASTM-OilColor_Analyzer.ijm
File Explorer
+ - File filter...
Валерия
1 // Макрос для автоматической бесприборной оценки цвета моторного масла по
2 // Разработан на основе гамма-корректированных значений sRGB
3
4 macro "ASTM-OilColor_Analyzer" {
5
6 // 1. Проверка: открыто ли изображение
7 if (nImages == 0) {
8     exit("Error: Please open an engine oil sample image first!");
9 }
10
11 // 2. Массивы эталонных значений sRGB из Таблицы 3 статьи
12 var astm_scores = newArray("0.5", "1.0", "1.5", "2.0", "2.5", "3.0", "
13 var r_st = newArray(255, 255, 255, 255, 255, 255, 247, 228, 214, 205, "
14 var g_st = newArray(232, 215, 192, 163, 132, 93, 51, 0, 0, 0, "
15 var b_st = newArray( 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, "
16
17 // 3. Запрос к пользователю на выбор области анализа (ROI)
18 setTool("rectangle");
19 waitForUser("ROI Selection", "1. Select a tool (Rectangle or Oval).\n2
20
21 // Проверка наличия выделения
22 type = selectionType();
23 if (type == -1) {
24     exit("Error: Selection (ROI) not found!");
25 }
26
27 // 4. Поканальное измерение средних значений RGB в выделенной области
28 run("Duplicate...", "title=temp_roi");
29 run("RGB Stack");
30
31 // Красный канал
32 setSlice(1);
33
34 Run Batch Kill REPL Show Errors Clear
Active language: None
Active language: ImageJ Macro
    
```

Рисунок 2. Фрагмент программного кода макроса *ASTM-OilColor\_Analyzer* в среде *ImageJ* для автоматизированного определения балльной оценки цвета по шкале *ASTM D 1500*

считывается евклидово цветовое расстояние  $\Delta E_{RGB}$  до каждого из 16 эталонных значений теоретической *sRGB*-матрицы (табл. 3) по формуле:

$$\Delta E_{RGB} = \sqrt{(R_{\text{экс}} - R)^2 + (G_{\text{экс}} - G)^2 + (B_{\text{экс}} - B)^2}.$$

Программа производит оптимизацию и присваивает цифровому изображению исследуемого нефтепродукта балл соответствующего элемента шкалы *ASTM* с минимальным значением  $\Delta E_{RGB}$ .

Результат экспресс-оценки выводится на экран в виде информационного диалогового окна «*Analysis Result*» с указанием установленного балла «*ASTM D 1500: ...*», значений цветовых координат «*Measured RGB: ...*» и величины погрешности сходимости цвета  $\Delta E_{RGB}$  «*Error (dE): ...*». В качестве примера на рисунке 3 представлен результат автоматизированной балльной оценки с использованием составленного макроса для цветового элемента шкалы *ASTM D 1500* с баллом 2.

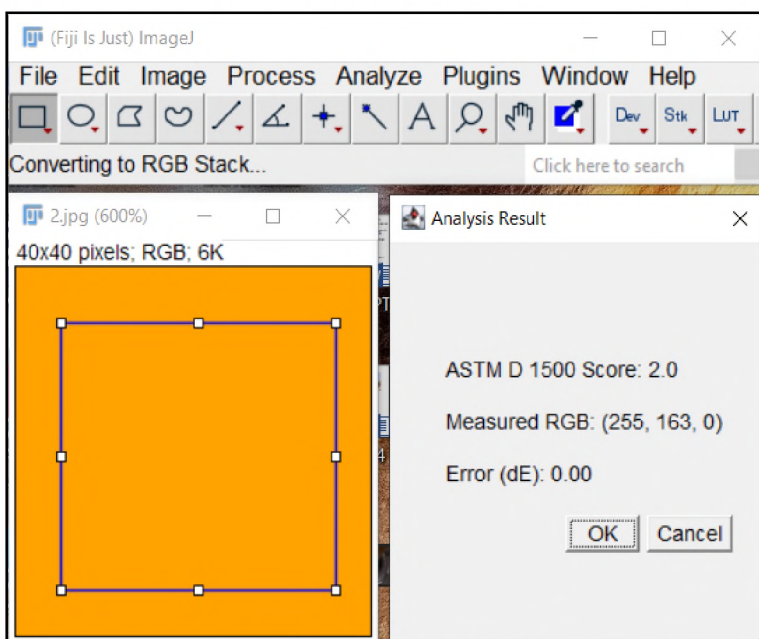


Рисунок 3. Результат автоматизированной балльной оценки по шкале *ASTM D 1500* с использованием разработанного макроса *ASTM-OilColor\_Analyzer*

Внедрение разработанного макроса позволяет оперативно и объективно контролировать цвет нефтепродуктов без привлечения специализированного лабораторного оборудования.

### Заключение

В результате проведенных исследований решена важная прикладная задача по цифровизации контроля качества нефтепродуктов, используемых в мобильной технике АПК.

Разработан и математически обоснован алгоритм сквозного аналитического преобразования абстрактных хроматических координат системы *RGB USC* стандарта *ASTM D 1500* в международное цифровое цветовое пространство *sRGB*. Рассчитаны точные матрицы линейных и гамма-корректированных значений интенсивности

излучения по базовым каналам (*R, G, B*) для всех 16 цветовых элементов эталонной шкалы.

Создана бесприборная методика автоматизированной экспресс-оценки цвета нефтепродуктов, базирующаяся на анализе цифровых изображений проб в среде *ImageJ*. Использование математического критерия минимизации евклидова цветового расстояния  $\Delta E_{RGB}$  между координатами экспериментальной пробы и разработанной *sRGB*-матрицей эталонов полностью исключает субъективный фактор при идентификации цвета.

Разработанный алгоритм успешно реализован в виде программного макроса *ASTM-OilColor\_Analyzer* для среды *ImageJ*. Программный модуль в интерактивном режиме осуществляет поканальное сканирование выбранной зоны интереса (*ROI*), сопоставляет полученные параметры с эталонной базой данных и мгновенно выводит итоговую оценку состояния нефтепродукта в баллах шкалы *ASTM D 1500* на экран пользователя.

Предложенная автоматизированная методика характеризуется низкими аппаратными требованиями, простотой реализации и высокой скоростью анализа. Это делает ее эффективным инженерным инструментом для оперативной оценки термоокислительной стабильности нефтепродуктов непосредственно в условиях ремонтных мастерских организаций АПК без привлечения дорогостоящего лабораторного оборудования и высококвалифицированных специалистов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – Москва: Химия, 1979. – 240 с.
2. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 2. Цветовые модели и возможности их применения при колориметрических методах / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, В.В. Остриков // *Агропанорама*. – 2025. – № 1. – С. 29-36.
3. Standard Test Method for Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale): *ASTM D 1500-12* (2017). – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. – 5 p.
4. Нефтепродукты. Метод определения цвета по шкале *ASTM*: СТБ 1796-2007. – Введ. 23.10.2007. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 10 с.
5. Ferreira, T. *ImageJ user guide / Fiji 1.46* / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
6. IEC 61966-2-1:1999. Multimedia systems and equipment. Colour measurement and management. Part 2-1. Colour management. Default RGB colour space – *sRGB* – 9 p.