

# МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGEJ

## ЧАСТЬ 1. КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

**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 работе предложен новый методический подход к количественной оценке экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторного масла с использованием программного комплекса ImageJ колориметрическими методами на примерах анализа цифровых изображений, полученных методом оценки цвета моторного масла и методом «капельной пробы».*

*Ключевые слова: моторное масло, экспресс-тестирование, ImageJ, колориметрический метод, цифровое изображение, метод оценки цвета, «капельная проба».*

*The paper proposes a new methodological approach to the quantitative assessment of experimental results of express testing of motor oil using the ImageJ software package by colorimetric methods using examples of the analysis of digital images obtained by the method of assessing the color of motor oil and the «Blotter Spot» method.*

*Key words: motor oil, express testing, ImageJ, colorimetric method, digital image, color assessment method, «Blotter Spot».*

### Введение

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одним из наиболее сложных и дорогостоящих агрегатов в составе мобильной сельскохозяйственной техники. Проблема обеспечения эксплуатационной надежности ДВС не может быть решена без объективной и достоверной информации об изменении его технического состояния. Работающее моторное масло (ММ), как один из конструктивных элементов ДВС, является источником информации, как об изменении его состояния в целом, так и об изменениях, происходящих в контактирующих с маслом узлах и системах ДВС.

Для определения свойств ММ в настоящее время применяются, как лабораторные методы, основанные на различных технических стандартах и требующие применения специализированного оборудования и привлечения квалифицированного персонала, так и экспресс-методы контроля, которые можно проводить с использованием простых приборов и приспособлений непосредственно в условиях предприятий АПК. Последние позволяют значительно снизить трудоемкость оценки качества ММ, проводить анализ за короткий промежуток времени непосредственно в процессе работы ДВС, что дает возможность своев-

ременно выявлять неполадки в его работе на ранней стадии их зарождения. Кроме того, экспресс-методы и соответствующие им средства для экспресс-тестирования (в отличие от лабораторных) доступны каждой сельскохозяйственной организации, поэтому им часто отдают предпочтение [1, 2].

Заключительным и основным этапом при проведении экспресс-тестирования ММ является обработка экспериментальных данных органолептическим методом [3]. Такая обработка во многих случаях заключается в получении цифровых изображений, их анализе и последующем сравнении с эталонными цифровыми изображениями, имеющими количественные и/или качественные характеристики. Однако органолептическая оценка зависит от индивидуального восприятия изображения исследователем и является, во-первых, субъективной, а, следовательно, может оказаться ошибочной и, во-вторых, трудоемкой.

Современный этап развития компьютерных технологий и автоматизации экспериментов характеризуется большими возможностями для обработки цифровых изображений, предусматривающей использование различных программных инструментов. Эти программные инструменты можно условно разделить на четыре группы:

– математические пакеты: *Mathcad*, *Matlab*, *Mathematica*, *Maple* и другие;

– индивидуальное программное обеспечение, создаваемое фирмами-производителями для различных приборов, например, для прибора *DT100* (определение диспергируемости ММ и содержания в нем сажи по хроматограмме, полученной методом «капельной пробы») (*Blotter Spot*) [4], для микроскопа МИ-2Т (автоматизированный анализ микроструктуры материалов) [5], для спектрофотометрического колориметра *PB 2201 Colour Check* (определение цветности нефтепродуктов) [6] и другие;

– собственные приложения исследователей, разрабатываемые с использованием различных языков программирования;

– готовые приложения: *Adobe Photoshop*, *Gimp*, *Picasa*, *Krita*, *Photom*, *Optimas*, *Image*, *Expert Pro*, *Imagej*, *Avizo* и *Smart-eye* и др.

Перечисленные программные инструменты имеют ряд недостатков. Так, использование математических пакетов приводит к сложностям с форматированием файлов изображений в формат представления числовых данных, что может привести к значительному искажению результатов. Индивидуальное программное обеспечение может быть использовано только для обработки данных, полученных на конкретных приборах. При использовании собственных приложений затрачиваемое на их разработку время многократно превышает время обработки изображений. В свою очередь, готовые приложения представляют интерес для качественной и количественной обработки цифровых изображений, однако использование большинства из них ограничено отсутствием в открытом доступе, что требует значительных финансовых затрат для их приобретения, и, самое главное, вызывает сложности при обработке данных из-за отсутствия подробных инструкций по использованию для решения конкретно поставленных задач.

В настоящее время среди готовых приложений для анализа цифровых изображений следует отметить находящийся в открытом доступе программный комплекс *ImageJ*, разработанный Вейном Расбандом в 1997 г. [7]. *ImageJ*, поставляемый с подробными инструкциями для решения конкретных задач, позволяет отображать, редактировать, анализировать и обрабатывать изображения в форматах *TIFF*, *PNG*, *GIF*, *JPEG*, *BMP* и других, осуществлять их колориметрический анализ, определять размеры и площади присутствующих на них объектов в пиксельных и натуральных значениях, производить различные геометрические преобразования, проводить статистическую обработку выделенных областей [8].

Программный комплекс *ImageJ*, первоначально разработанный для работников биомедицинской сферы, в настоящее время нашел широкое применение для решения задач в различных областях науки и техники. Так, использование этого комплекса позволило провести колориметрический анализ и локальную корреляцию изображений клеток живых организмов [9], мультифрактальный анализ 2D и 3D изоб-

ражений почв [10], определить размеры пор, их количество и морфологию поверхности нанопористого анодного оксида алюминия [11], размеры гранул крахмала клубней картофеля [12], рассчитать средний диаметр пор нанотрубчатых пленок  $TiO_2$  [13], исследовать поровую структуру губчатых изделий (пористость и распределение пор по размерам) [14], оценить размеры повреждений сельскохозяйственных культур различными вредителями [15].

Анализ приведенных выше примеров показывает, что методы обработки цифровых изображений с использованием программного комплекса *ImageJ* можно условно разделить на две группы: колориметрические методы, предусматривающие оценку цвета изображений, и методы оценки размеров, формы и / или количества наблюдаемых объектов. Такие методы обработки могут быть использованы для анализа цифровых изображений, получаемых при проведении экспресс-методов тестирования ММ. Так, колориметрические методы обработки цифровых изображений с использованием программного комплекса *ImageJ* могут быть применены для оценки загрязненности ММ путем определения его цвета методом *ASTM D1500* [16] или цвета фильтрограммы при проведении патч-тестирования [17], для установления работоспособности ММ по интенсивности окраски кольцевых зон на хроматограмме, полученной методом «капельной пробы» [18], для определения водородного показателя *pH* по цвету кислотно-щелочного индикатора [2].

Целью работы является обоснование новых методических подходов, основанных на использовании программного комплекса *ImageJ*, для анализа цифровых изображений, получаемых при проведении различных методов экспресс-тестирования ММ.

Целью первой части данной работы является разработка методического подхода к количественной оценке экспериментальных результатов экспресс-тестирования ММ колориметрическими методами.

### Основная часть

Новый методический подход к анализу изображений колориметрическими методами при проведении экспресс-тестирования ММ проиллюстрируем на примере экспресс-методов – оценки цвета ММ и метода «капельной пробы».

#### Метод оценки цвета ММ

Данный метод предполагает оценку цвета цифрового изображения исследуемого ММ в баллах путем сравнения с соответствующим цветом балльной шкалы *ASTM D 1500*, представляющей собой палитру из цветовых элементов, оцениваемых в диапазоне 0,5–8,0 баллов с шагом измерений 0,5 балла.

Методический подход колориметрического метода оценки цвета ММ состоит из двух этапов:

- калибровка балльной шкалы *ASTM D 1500*;
- непосредственная количественная оценка экспериментальных результатов по цифровым изображениям фрагментов исследуемого ММ.

Калибровка балльной шкалы ASTM D 1500

Для этого изображение оригинальной балльной шкалы ASTM D 1500 (рис. 1) переносим в программу ImageJ путем выбора следующей последовательности команд из строки меню *File* → *Open* → выбранный файл изображения (рис. 1а) и переводим изображение в 8-битное полутоновое, соответствующее оттенкам серого цвета (*Image* → *Type* → *8-bit*) (рис. 1б).

Для определения цвета цветowych элементов шкалы ASTM D 1500 (рис. 2) на панели инструментов выбираем кнопку «*Rectangle*» и выделяем область на первом цветовом элементе (0,5 балла). После выбора в строке меню последовательности команд *Analyze* → *Measure* открывается окно «*Results*», в котором в столбце *Mean* отображается значение цвета выделенного цветового элемента в пикселях (рис. 2а). Далее, последовательно проводя аналогичные операции для всех цветowych элементов шкалы, определяем для них значения цветов в пикселях (рис. 2б).

Для калибровки балльной шкалы (рис. 3) в строке меню, выбирая последовательность операций *Analyze* → *Calibrate*, открывается окно «*Calibrate*», в котором в первом столбце отображаются значения цвета в пикселях каждого элемента шкалы, а во второй вносим соответствующие им оценки в баллах шкалы ASTM D1500 (рис. 3а). Далее, в строке *Function* выбираем функциональную зависимость, наилучшим образом аппроксимирующую полученные численные значения цветовой шкалы. При нажатии кнопки *OK*

раскрывается окно с установленной графической зависимостью баллов шкалы ASTM D 1500 от значений цвета в пикселях (рис. 3б).

Сохранение полученных данных в окне «*Calibrate*» нажатием кнопки «*Save*» дает возможность определять цвет любого выбранного цифрового изображения фрагмента исследуемого ММ.

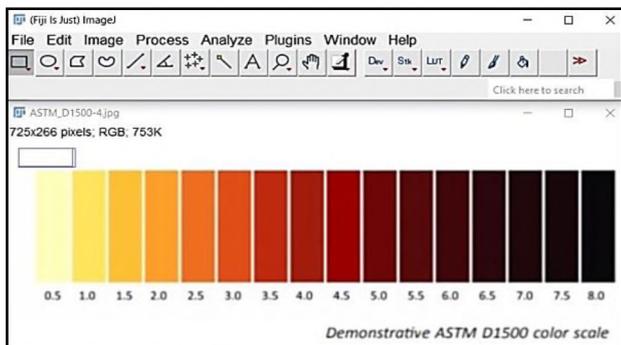
Количественная оценка экспериментальных результатов по цифровым изображениям фрагментов исследуемого ММ

В качестве примера проведем оценку цвета ММ Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 0, 30, 100 и 200 ч. Для этого переносим цифровые изображения фрагментов ММ с различной наработкой в программу ImageJ и переводим изображения в 8-битные (рис. 4).

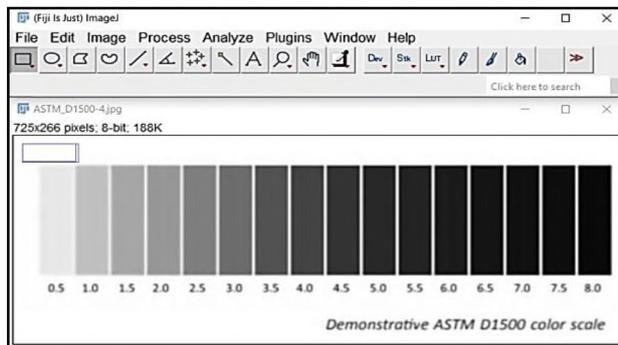
В окне «*Calibrate*» (*Analyze* → *Calibrate*) кнопкой «*Open*» устанавливаем сохраненные данные калибровки для данной задачи (метод оценки цвета ММ). Поочередно, после нажатия кнопки «*Rectangle*», выделяем области на цифровых изображениях ММ и получаем в окне «*Results*» (*Analyze* → *Measure*) в столбце *Mean* значения их цвета в баллах шкалы ASTM D 1500 (рис. 5).

Окончательную обработку результатов и построение гистограммы зависимости цвета ММ по балльной шкале ASTM D 1500 от наработки проводим при помощи пакета анализа данных программы MS Excel 2010 (рис. 6).

Приведенный пример доказывает возможность

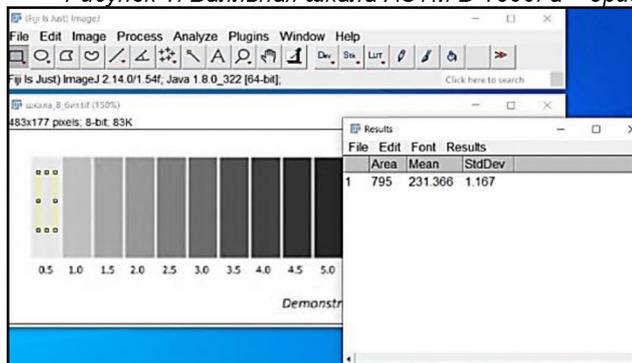


а

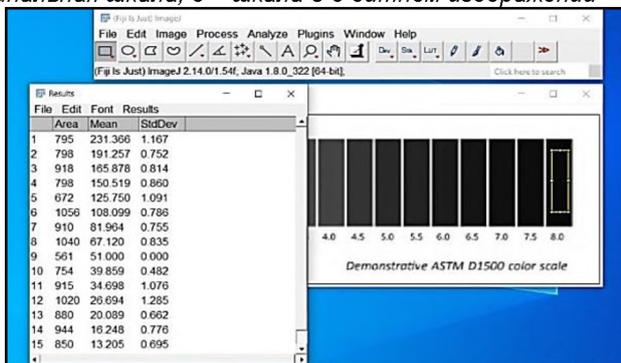


б

Рисунок 1. Балльная шкала ASTM D 1500: а – оригинальная шкала; б – шкала в 8-битном изображении

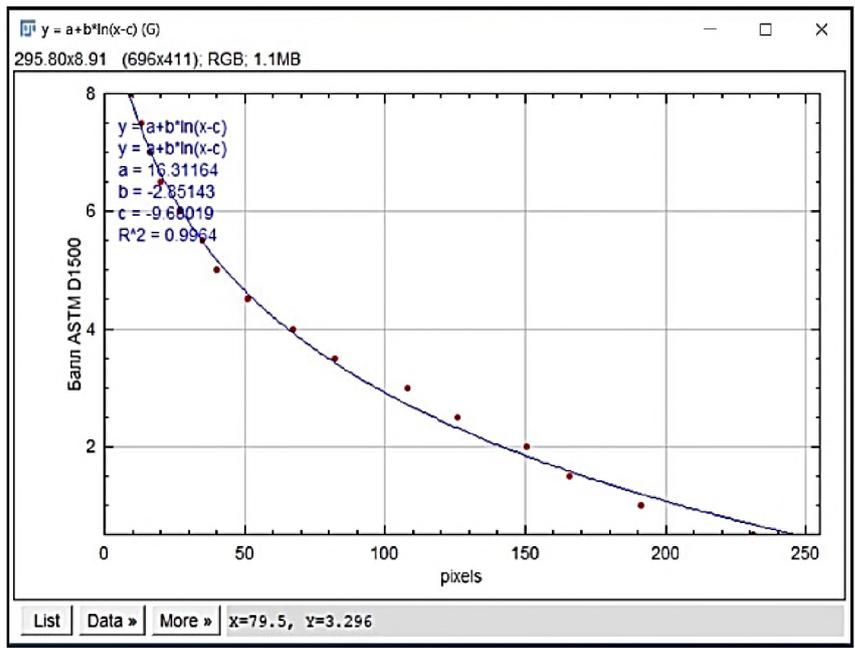
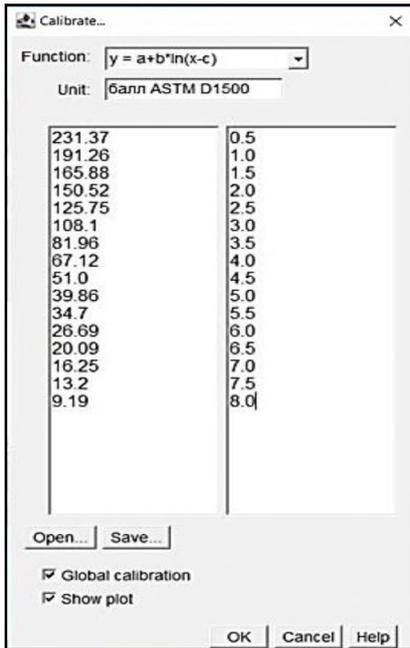


а



б

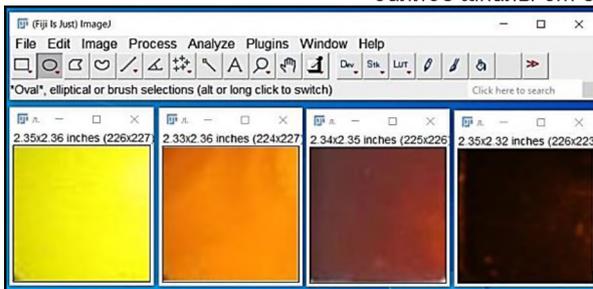
Рисунок 2. Определение значений цветов цветowych элементов шкалы ASTM D1500 в пикселях: а – первого элемента; б – всех элементов



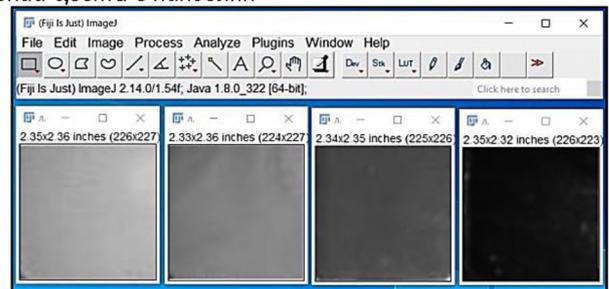
**а**

**б**

Рисунок 3. Калибровка шкалы ASTM D 1500: а – табличные значения; б – графическая зависимость баллов шкалы от значений цвета в пикселях



**а**



**б**

Рисунок 4. Цифровые изображения ММ Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой: а – цветное изображение; б – 8-битное изображение

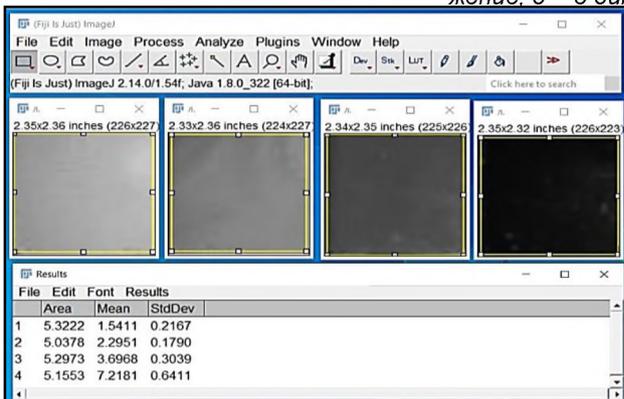


Рисунок 5. Определение цвета ММ по балльной шкале ASTM D 1500 согласно предлагаемому методическому подходу

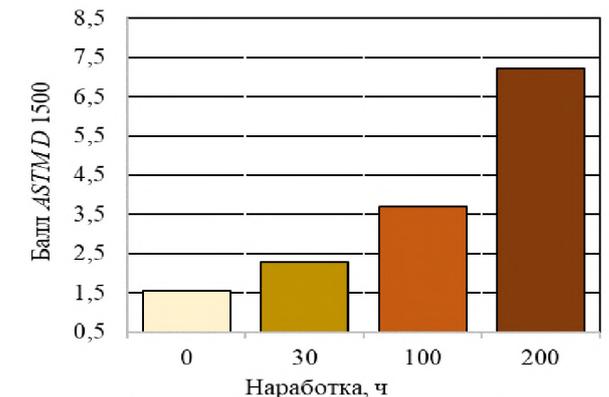


Рисунок 6. Гистограмма зависимости цвета ММ по балльной шкале ASTM D 1500 от наработки

использования программного комплекса *ImageJ* для объективной оценки загрязненности ММ по цвету его изображения в баллах шкалы *ASTM D 1500* с высокой точностью (99,6 %).

**Метод «капельной пробы» (Blotter Spot)**

Данный метод при установлении работоспособности ММ предполагает по полученному цифровому

изображению масляного пятна (хроматограмме) определение интенсивности окраски кольцевых зон и их сравнение с эталонными балльными шкалами, представляющими собой палитры из цветовых элементов ядра и диффузионной зоны, оцениваемых в диапазоне 1–9 баллов с шагом измерений – 1 балл.

Методический подход колориметрического метода при определении интенсивности окраски кольцевых зон хроматограммы ММ, полученной методом «капельной пробы», также, как и при вышеописанном методе оценки цвета ММ, состоит из двух этапов:

- калибровка балльных шкал ядра и диффузионной зоны;
- непосредственная количественная оценка экспериментальных результатов по цифровым изображениям хроматограмм ММ.

*Калибровка балльных шкал ядра и диффузионной зоны*

По аналогии с установлением цвета ММ по балльной цифровой шкале *ASTM D 1500* определение интенсивности окраски цветовых элементов шкал ядра и диффузионной зоны (рис. 7) производим следующим образом. Переносим цифровые изображения балльных шкал ядра 1 и диффузионной зоны 2 в программу *ImageJ* (рис. 7а) и переводим эти изображения в 8-битные (рис. 7б).

Далее калибровку цветовых балльных шкал ядра и диффузионной зоны, в отличие от калибровки для оценки цвета по шкале *ASTM D 1500*, производим по отдельности. Результаты проведенной калибровки балльных шкал ядра и диффузионной зоны представлены на рисунках 8, 9.

Сохраненные данные калибровки цифровых шкал ядра и диффузионной зоны позволяют по цифровому изображению хроматограммы ММ определить интенсивность окраски ядра и диффузионной зоны в баллах, по значениям которых можно судить о работоспособности ММ.

*Количественная оценка экспериментальных результатов по цифровым изображениям хроматограмм ММ*

Определение интенсивности окраски ядра и диффузионной зоны хроматограмм проведем на примере ММ Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 30, 135 и 250 ч согласно разработанному алгоритму анализа изображений, состоящему из следующих четырех стадий (табл. 1).

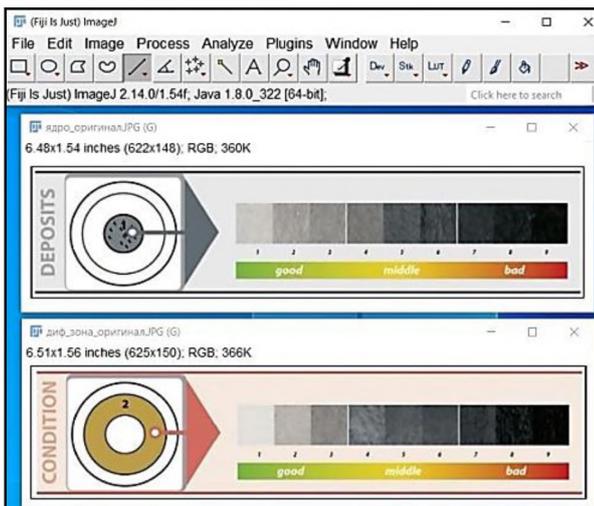
На I стадии переносим цифровое изображение исследуемых хроматограмм ММ в программу *ImageJ* и далее, на II стадии переводим изображения в 8-битные. После чего устанавливаем сохраненные данные калибровки шкалы ядра, нажимаем кнопку «Oval» на панели инструментов и выделяем область зоны ядра. При выборе в строке меню последовательности команд *Analyze* → *Measure* открывается окно «Results», в котором в столбце *Mean* отображается значение цвета выделенного фрагмента (ядра) в баллах (стадия III). По аналогии с определением цвета ядра (стадия III) определяем цвет диффузионной зоны, выделяя ее после нажатия кнопки «Freehand selections» на панели инструментов (стадия IV).

Окончательную обработку результатов и построение гистограммы интенсивности окраски ядра и диффузионной зоны на хроматограммах ММ с различной наработкой проводим при помощи пакета анализа данных программы *MS Excel 2010* (рис. 10).

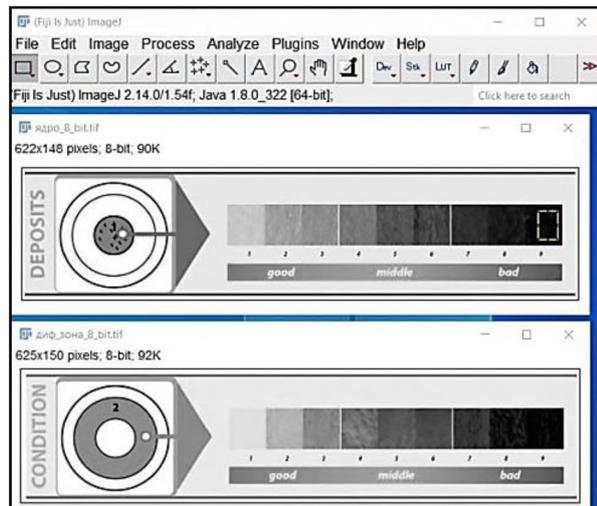
Приведенный пример доказывает возможность использования программного комплекса *ImageJ* для объективной оценки интенсивности окраски кольцевых зон хроматограмм ММ по цвету их изображений в баллах шкал ядра и диффузионной зоны с высокой точностью (99,1–99,5 %).

**Заключение**

Разработан новый методический подход к количественной оценке экспериментальных результатов

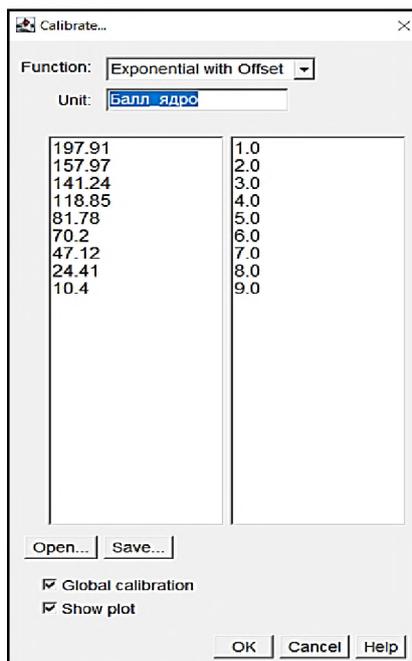


**а**

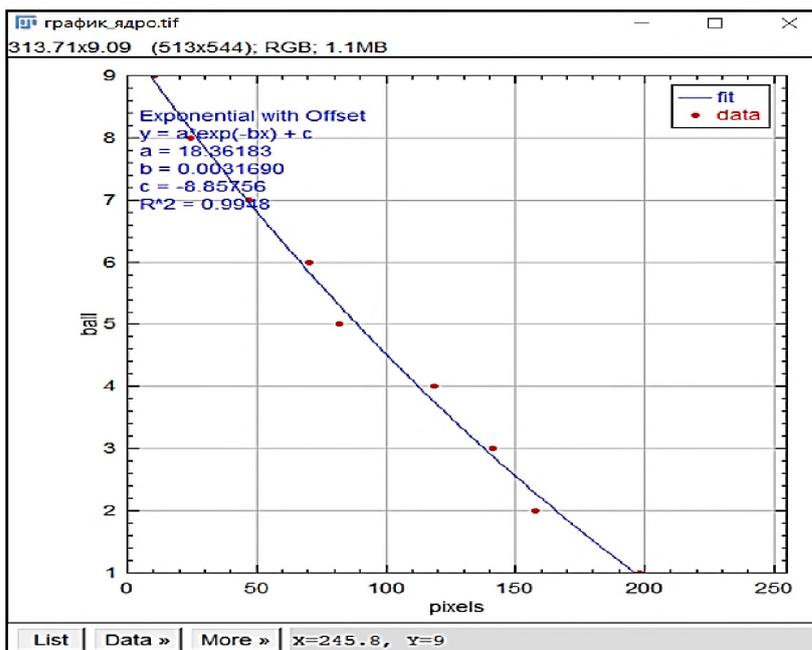


**б**

Рисунок 7. Балльные шкалы ядра 1 и диффузионной зоны 2: а – оригинальные шкалы; б – шкалы в 8-битном изображении

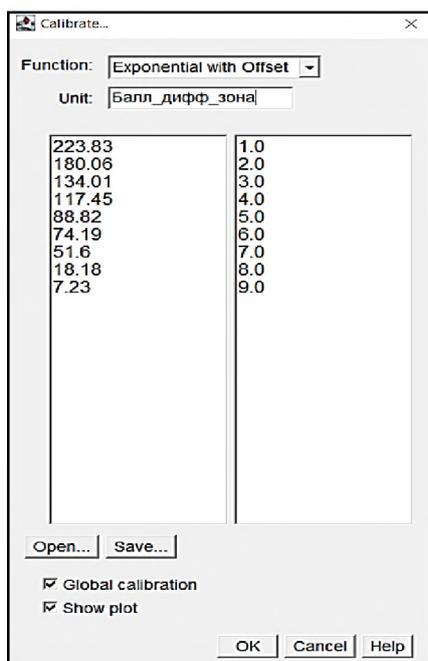


**а**

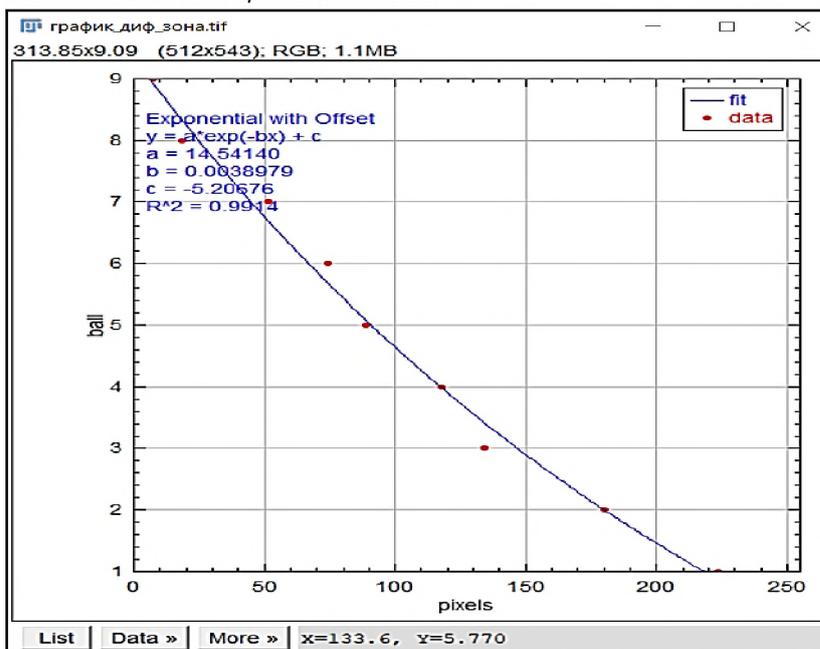


**б**

Рисунок 8. Калибровка балльной шкалы ядра: а – табличные значения; б – графическая зависимость баллов шкалы от значений цвета в пикселях



**а**



**б**

Рисунок 9. Калибровка балльной шкалы диффузионной зоны: а – табличные значения; б – графическая зависимость баллов шкалы от значений цвета в пикселях

экспресс-тестирования ММ колориметрическими методами, основанными на использовании программного комплекса *ImageJ*. Новый подход апробирован на примерах анализа цифровых изображений, полученных методом оценки цвета ММ и методом «капельной пробы».

Разработанный методический подход, включающий два этапа (калибровку оригинальных цветowych

балльных шкал и непосредственную количественную оценку экспериментальных результатов по цифровым изображениям), позволяет отказаться от субъективного и трудоемкого анализа (в отличие от органолептических методов) и позволяет проводить анализ изображений с высокой точностью за короткий промежуток времени непосредственно в полевых условиях АПК.

**Таблица 1. Алгоритм количественной оценки интенсивности окраски  
кольцевых зон хроматограмм ММ в баллах**

№ стадии	Стадии количественной оценки интенсивности окраски кольцевых зон хроматограмм ММ Лукойл Авангард 10И40 с наработкой, ч		
	30	135	250
I			
II			
III			
IV			

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гурьянов, Ю.А. Экспресс-методы и средства диагностирования агрегатов машин по параметрам масла: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Ю.А. Гурьянов. – Челябинск, 2007. – 371 л.

2. Остриков, В.В. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости: учеб. пособие / В.В. Остриков [и др.]; под редакцией В.В. Острикова. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 244 с.

3. Сидоров, В.А. Техническая диагностика механического оборудования: учебник / В.А. Сидоров. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 256 с.

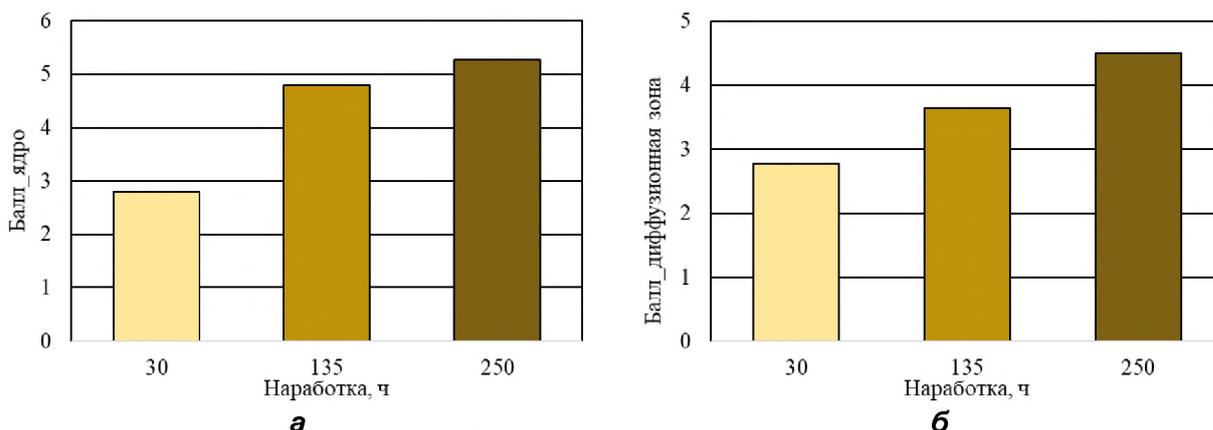


Рисунок 10. Гистограммы интенсивности окраски кольцевых зон хроматограмм ММ с различной наработкой: а – ядра; б – диффузионной зоны

4. Standard test method for measuring the merit of dispersancy of in-service engine oils with blotter spot method: ASTM D7899-19. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. – 7 p.

5. Микроскоп МИ-2 (Т)/ ПромГруппПрибор. – URL: <https://pgpribor.com/product/mikroskop-mi-2-t>. (дата обращения: 14.12.2024).

6. Spectrophotometer UV-VIS PB 2201 ColourCheck / Solar. – URL: <https://solar.by/en/uv-vis-2201-colourcheck/> (date of access: 13.12.2024).

7. Ferreira, T. ImageJ user guide /Фиг 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.

8. Schroeder, A. B. The ImageJ ecosystem: open-source software for image visualization, processing, and analysis / A.B. Schroeder [et al.] // Protein Science. – 2021. – № 30. – P. 234-249.

9. Demandolx, D. Multicolour analysis and local image correlation in confocal microscopy / D. Demandolx, J. Davoust // Journal of Microscopy. – 1997. – Vol. 185. – Pt. 1. – P. 21-36.

10. Torre, I.G. Multifrac: An ImageJ plugin for multiscale characterization of 2D and 3D stack images / I.G. Torre, R.J. Heck, A.M. Tarquis // SoftwareX. – 2020. – № 12. – 100574.

11. Динь, Х.Т. Цифровая обработка изображений наноразмерных элементов на наноструктурированной поверхности материалов с помощью программы ImageJ / Х.Т. Динь [и др.] // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 79-84.

12. Хлесткин, В.К. Практическое руководство по оценке морфологии гранул картофельного крахмала методом микрофотоирования / В.К. Хлесткин, Т.В.

Эрст // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2017. – № (6). – Том 21. – С. 728-734.

13. Чернякова, К.В. Цифровая обработка и анализ 2D изображений пленок нанотрубчатого оксида титана с использованием ImageJ / К.В. Чернякова, И.А. Врублевский, М.Ф.С.Х. Аль-Камали // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы Международного науч-технич. семинара, Минск, апрель – декабрь 2015 г. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 86-90.

14. Саввин, П.Н. Перспективы сканерометрии в оценке пористости губчатых изделий / П.Н. Саввин [и др.] // Труды БГТУ. – № 4 Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – С. 81-83.

15. Stawarczyk, M. Use of the ImageJ program to assess the damage of plants by snails / M. Stawarczyk, K. Stawarczyk // Chem Didact Ecol Metrol. – 2015. – № 20 (1-2). – P. 67-73.

16. Standard Test Method for Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale): ASTM D1500-12 (2017). – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. – 5 p.

17. Fitch, J.C. The Lubrication Field Test and Inspection Guide / J.C. Fitch // Noria Corporation. – 2000. – 36 p.

18. Патент RU 2 649 095, МПК G 01 N 21/29. Способ и устройство для анализа масел и технических рабочих жидкостей для квалифицированной оценки рабочих состояний элементов: заявлено 11.09.14; опубл. 29.03.2018 / Хорстмейер Г.; заявитель: Г. Хорстмейер.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.12.2024