



ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНЕННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ ШАБЛОНОВ

Наталья Николаевна Минакова

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
minakova@asu.ru

Аннотация. Резистивные полимерные композиционные материалы применяются в электроэнергетике, электрофизике и т.д. Неоднородная структура таких материалов, определяющая их свойства, затрудняет прогнозирование характеристик. Поэтому актуален поиск новых подходов к оценке свойств резистивных полимерных композиционных материалов

Рассматриваются резистивные полимерные композиционные материалы на основе каучуков с модификацией поверхности технического углерода, в которые свойства во многом формируются за счет регулирования степени агломерирования технического углерода и межфазных взаимодействий между электропроводящим и связующим компонентами. Предложена оценка действия этих эффектов на структуру материалов по гистограммам текстур изображения макроструктуры с использованием метода локальных бинарных шаблонов. Применялись одноканальная и трехканальная (модель RGB) гистограммы. Для сравнения гистограмм структур рассчитывались расстояния Бхаттачария и Кульбака–Лейблера. Показана корректность их применения к изображениям структур, наполненных техническим углеродом каучуков для оценки величины объемного электрического сопротивления и его изменения при эксплуатационных воздействиях (температура, агрессивная среда, сжимающая нагрузка). Сделан вывод о том, что использование в расчетах расстояния Кульбака–Лейблера при сравнении изображений структур лучше отражает динамику электрофизических характеристик материалов при рассмотренных эксплуатационных воздействиях, чем сравнение гистограмм по расстоянию Бхаттачария.

Ключевые слова: изображение макроструктуры, полимерные композиционные материалы, наполненные техническим углеродом каучуки, модифицированный технический углерод, текстурный анализ, объемное электрическое сопротивление, метод локальных линейных шаблонов, гистограммы яркости, расстояние Бхаттачария, расстояние Кульбака–Лейблера.

Для цитирования: Минакова Н. Н. Оценка электрофизических характеристик наполненных модифицированным техническим углеродом композиционных материалов с помощью метода локальных бинарных шаблонов // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 230–236. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.029. EDN: <https://elibrary.ru/GQAEUO>.

EVALUATION OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS FILLED WITH MODIFIED TECHNICAL CARBON COMPOSITE MATERIALS WITH THE HELP OF THE METHOD OF LOCAL BINARY TEMPLATES

Natalia N. Minakova

Altai State University, Barnaul, Russiaminakova@asu.ru

Abstract. Resistive polymer composite materials are used in electrical power engineering, electrophysics, etc. The heterogeneous structure of such materials, determining their properties, makes it difficult to predict the characteristics. Therefore, it is relevant to search for new approaches to assessing the properties of resistive polymer composite materials

Resistive polymer composite materials based on rubbers with modification of the carbon black surface are considered, in which properties are largely formed by regulating the degree of agglomeration of carbon black and interphase interactions between electrically conductive and binding components. An assessment of the effect of these effects on the structure of materials by histograms of textures of macrostructure images using the method of local binary templates is proposed. Single-channel and three-channel (RGB model) histograms were used. To compare histograms of structures, the distances of Bhattacharya and Kulback-Leibler were calculated. The correctness of their application to images of structures filled with technical carbon rubbers for estimating the volume electrical resistance and its changes under operating influences (temperature, aggressive environment, compressive load) is shown. It is concluded that the use of the Kulback-Leibler distance in the calculations when comparing the images of structures better reflects the dynamics of the electrophysical characteristics of materials under the considered operational impacts than the comparison of histograms by the Bhattacharya distance.

Keywords: macrostructure image, polymer composite materials, technical carbon-filled rubbers, modified technical carbon, textural analysis, volumetric electrical resistance, local linear pattern method, brightness histograms, Bhattacharya distance, Kulback-Leibler distance.

For citation: Minakova, N.N. (2023). Evaluation of electrophysical characteristics filled with modified technical carbon composite materials with the help of the method of local binary templates. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 230-236. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.029. EDN: <https://elibrary.ru/GQAEUO>.

Полимерные композиционные материалы с электропроводящими наполнителями применяются в различных устройствах [1, 2, 3]. Это требует регулирования электрофизических и механических характеристик. Разработка композиционных материалов с заданными свойствами затрудняется невозможностью корректного математического описания структуры из-за разнообразных физико-химических взаимодействий, реализующихся в многокомпонентной структуре. Для прогнозных оценок применяются различные методы и средства, например, микроскопические снимки структуры композиционных материалов. Информативные признаки и средства классификации по ним выбираются в зависимости от характеристик структуры.

Для изучения микрофотографий структуры наполненных техническим углеродом

каучуков применялся текстурный анализ [4]. Используются текстурные признаки изображения, полученные на основании матрицы смежности интенсивностей пикселей изображения структуры [4]. Такой подход связан с высокой вычислительной сложностью.

Особенное затруднение вызывает оценка свойств наполненных техническим углеродом каучуков из-за его способности к агломерированию. Проблемы при анализе микрофотографий вызывает также оценка вклада в формирование свойств межфазных взаимодействий, имеющих место в многокомпонентной среде [5]. Проведенные эксперименты подтверждают, что микрофотографии материалов, слабо отличающиеся по внешнему виду, имеют большие различия по электрофизическим и механическим характеристикам [2, 6].

Представляло интерес расширить инструментарий для оценки совместного действия эффектов агломерирования и межфазных взаимодействий по микрофотографиям структуры, упростив методику оценки и уменьшив вычислительную сложность.

В [7] на модельных структурах показано, что применение метода локальных бинарных шаблонов для оценки текстуры изображения позволяет учесть способность электропроводящего наполнителя к агломерированию.

Влияние на структуру композиционного материала агломерирования и межфазных взаимодействий формируется исходными компонентами и технологическим процессом [2, 6]. В работах [4, 6] показано, что агломерирование и межфазные взаимодействия можно регулировать модификацией поверхности технического углерода, полученного серийным способом. Это связано с тем, что поверхность имеет значительную энергетическую неоднородность, что влияет на способность технического углерода вступать во взаимодействие со связующей основой. Такое влияние является функцией поверхностной энергии технического углерода и энергии когезии полимера [8, 9]. Структура поверхностного слоя зависит от вида модификации [9, 10, 11].

Исследования проводились на материалах с модифицированной поверхностью технического углерода. Применена модификация поверхности технического углерода, полученного промышленным способом, за счет ее предварительной обработки. Это позволяет практически не расходовать время на отработку технологии (достаточно рабочей корректировки). Модификация технического углерода недорога и технологически сравнительно легко выполняется [8].

В качестве объектов исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки, в которых использовался технический углерод с различными модификациями поверхности. Поверхности технического углерода изменялись за счет термообработки в окислительной среде при температуре 400 °С в течение 10 минут и обработки раствором ацетона при концентрации $C = 0,10$ %. Термообработка, согласно [12], изменяет количество носителей заряда в частицах технического углерода. Обработка растворителем может улучшить диспергирование [6]. Кроме того, ацетон, как полярный растворитель, способен убрать полярные вещества, находящиеся на поверхности частиц технического углерода [8].

Исследовались микрофотографии материалов при концентрации электропроводящего наполнителя 80 весовых частей на 100 весовых частей (в.ч.) каучука. Анализировались

16 микрофотографий для каждого материала. На рисунке 1 представлены микрофотографии материала на основе бутилкаучука (БК-2055), технический углерод П-514.

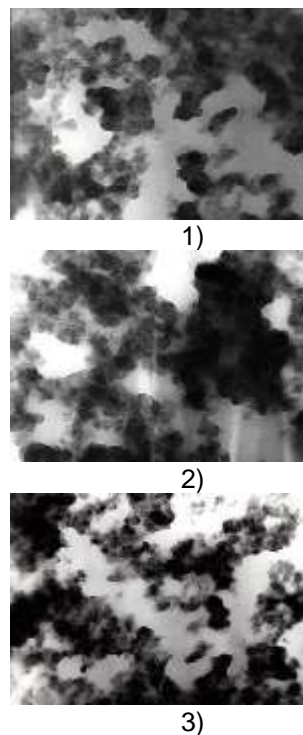


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические снимки (увеличение 32000): связующее БК-2055,80 в.ч. на 100 в. ч. электропроводящий компонент П-514: 1) исходный; 2) термообработка в окислительной среде; 3) обработка раствором ацетона

Figure 1 - Electron microscopic images (magnification 32000): binder BK-2055, 80 V.h. per 100 V. h. electroconducting component P-514: 1) initial, 2) heat treatment in an oxidizing Medium, 3) treatment with acetone solution

Для выбора информативных характеристик было предположено, что межфазные взаимодействия влияют на спектр градаций серого, что может отражаться на массиве значений яркости пикселей в изображении структуры. Уровень яркости можно отследить по контрастной характеристике текстуры изображения методом локальных бинарных шаблонов

Результаты расчета по микрофотографиям сопоставлялись с электрофизическими характеристиками материалов.

Использовались резисторы – образцы диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м. Измерения величин объемного электрического сопротивления (ρ_v) и температурного коэффициента сопротивления (ТКС, $1/^\circ\text{C}$) выполнялись по стандартным методикам [2]. Количество образцов на точку при испытаниях опре-

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНЕННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ ШАБЛОНОВ

делялось по дисперсии исследуемого признака при предельной ошибке не более 5 % и составляло не менее 12 штук. Результаты представлены на рисунках 2–3.

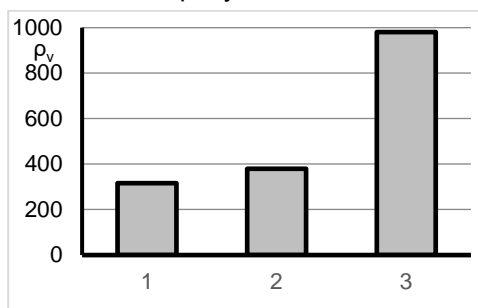


Рисунок 2 – Зависимость величины ρ_v от характеристик модификации поверхности технического углерода П-514: 1) исходный; 2) термообработка в окислительной среде; 3) обработка раствором ацетона. БК-2055, 80 в.ч. на 100 в. ч. П-514

Figure 2 - Dependence of the value of ρ_v on the characteristics of the modification of the surface of carbon black P-514: 1) initial, 2) heat treatment in an oxidizing medium, 3) treatment with acetone solution. BK-2055, 80 V.h. on 100 V. h. P-514

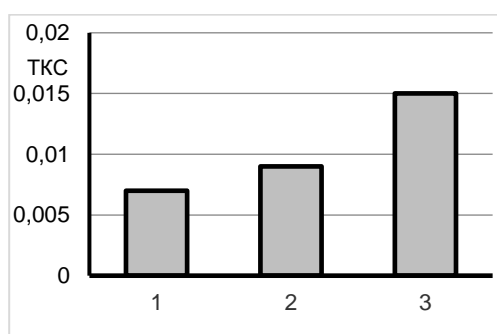


Рисунок 3 – Зависимость температурного коэффициента сопротивления от характеристик модификации поверхности технического углерода. П-514: 1) исходный; 2) термообработка в окислительной среде; 3) обработка раствором ацетона, $C = 0,10\%$. БК-2055, 80 в.ч. на 100 в. ч. П-514

Figure 3 - Dependence of the temperature coefficient of resistance on the characteristics of the modification of the surface of the technical electrode. P-514: 1) initial, 2) heat treatment in an oxidizing medium, 3) treatment with acetone solution, $C = 0.10\%$. BK-2055, 80 V. h. per 100 V. h. P-514

Анализировалась величина объемного электрического сопротивления при эксплуатационных воздействиях, так как межфазные взаимодействия неаддитивно формируются

под действием эксплуатационных факторов.

Экспериментально определялись:

- изменение величины объемного электрического сопротивления при деформации сжатия ($\Delta\rho_v, \%$);

- изменение величины объемного электрического сопротивления при старении в трансформаторном масле ($\Delta\rho_v, \text{тр.м.}, \%$).

Диапазон температур при определении температурного коэффициента сопротивления составлял $+20 - +200$ °С. Период времени для анализа изменения величины ρ_v в трансформаторном масле – один год (8760 часов). Величина сжимающей нагрузки определялась в атмосферах ($P = 12$ атм). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика объемного электрического сопротивления материалов при эксплуатационных воздействиях

Table 1 - Dynamics of the volumetric electrical resistance of materials under operational influences

Обработка технического углерода (П514)	$\Delta\rho_v, \%$	$\Delta\rho_{v, \text{тр.м.}}, \%$
Исходный	208	178
Окисл. среда, 400°, 10 минут	215	192
Ацетон, $C = 0,10\%$	235	226

Сравнение изображений выполнялось с помощью локальных бинарных шаблонов (LBP). Подход позволяет уменьшить вклад возможных разных условий по освещенности и повороту образца при получении изображения [13, 14]. Распределение кода позволяет описывать текстуру по информации об изменении яркости на изображении [15].

Базовый оператор LBP описывает окрестности пикселя изображения как восьмиразрядный бинарный код [15]. Значение интенсивности центрального пикселя принимается в качестве порога. Сравняются интенсивности центрального пикселя со значениями интенсивностей пикселей окрестности. На основе полученных бинарных кодов формируются гистограммы – векторы признаков участка изображения определенной интенсивности [13, 14]. Каждый шаблон несет в себе информацию о соседних точках [16].

Для расчетов разработана программа ЭВМ на языке Python с использованием функций библиотеки Open CV. Изображения унифицировались: при необходимости автоматически преобразовывались до требуемых размеров с помощью возможности библиотеки

Open CV (метод билинейной интерполяции) [17].

Обработка выполнялась с помощью Open CV по методике, изложенной в [7]. Изображения представлялись в рамках одно-канальной и трёхканальной гистограмм (цветовой модели RGB – комбинации 3 основных цветов Red (красный), Green (зелёный), Blue (синий) [18].

Для оценки сходства изображений применены функции сравнения гистограмм изображений, указанные далее (меньше значение указывает на лучше соответствие структур).

Взвешенное расстояние Кульбака–Лейблера в симметричной форме вычислялось по формуле [19]:

$$d(H_1, H_2) = \sum_I H_1(I) \log \left(\frac{H_1(I)}{H_2(I)} \right)$$

где H_1, H_2 – сравниваемые гистограммы изображений.

Расстояние Бхаттачария [20]:

$$d_b(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{\sum_i \sqrt{H_1(i) \cdot H_2(i)}}{\sqrt{\sum_i H_1(i) + \sum_i H_2(i)}}}$$

где H_1 и H_2 – сравниваемые гистограммы, $H_1(i)$ и $H_2(i)$ – элементы соответствующих гистограмм с номером i .

Полученные результаты представлены в таблицах 2–3.

Таблица 2 – Сравнение объектов исследования с помощью одноканальных гистограмм

Table 2 - Comparison of research objects using single-channel histograms

Изображения (номер по рис. 1)	Сравнение с помощью вычисления расстояний	
	Бхаттачария	Кульбака– Лейблера
1 2	0,2469	12443
2 3	0,2770	14579
1 3	0,387	27599

Сравнение диапазонов изменений одно-канальной и трехканальной гистограмм (табл. 2, 3) показывают, что при использовании расстояния Кульбака–Лейблера для трехканальной гистограммы разница фиксируется больше, и ближе соответствует разнице в свойствах (табл. 1).

В рассматриваемых материалах реализуются два эффекта – агломерирование наполнителя и межфазное взаимодействие. Поэтому представляло интерес сопоставить

данные, полученные на выбранных объектах исследования, с данными, полученными в [7] для структур, моделирующих эффект агломерирования технического углерода (табл. 4).

Таблица 3 – Сравнение объектов исследования с помощью трехканальных гистограмм

Table 3 - Comparison of research objects using three-channel histograms

Изображения (номер по рис. 1)	Сравнение с помощью вычисления расстояний	
	Бхаттачария	Кульбака– Лейблера
1 2	0,1630	8325
2 3	0,1748	9275
1 3	0,2446	17898

Данные получены для изображений, полученных в рамках имитационной модели, учитывающей поведение первичного и вторичного агрегата в технологическом процессе. Обработывались модельные структуры: количество частиц в первичном – 0 – 120 и вторичном агрегате – 60 – 60 [7].

Таблица 4 – Сравнение гистограмм яркости модельных структур

Table 4 - Comparison of brightness histograms of model structures

Расстояния	Каналы	Сравниваемые объекты	
		а	б
Бхаттачария	1	0,081	0,092
	3	0,0542	0,064
Кульбака– Лейблера	1	5289	3553
	3	3526	2369

Результаты численных экспериментов показали, что вклад в формирование электрофизических характеристик эффектов, реализуемых в наполненных модифицированным техническим углеродом каучуках, учитывается результатами сравнения одно- и двухканальных гистограмм с помощью выбранных расстояний.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенный подход фиксирует разницу по гистограммам при оценке соответствия структур материалов, то есть метод LBP реагирует на модификацию поверхности технического углерода.

2. Выбранные методы расчета расстояний между гистограммами структур с техническим углеродом разной модификации поверхности позволяют оценить вклад в формирование электрофизических характеристик

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНЕННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ ШАБЛОНОВ

изменения агломерирования наполнителя и межфазных взаимодействий между электропроводящим и связующим компонентами.

3. Предложенный подход к сравнению материалов показывает, что результаты вычисления расстояний указывают на экспериментально подтвержденную закономерность изменения электропроводности при рассмотренных эксплуатационных воздействиях: увеличение разницы в свойствах материалов связано с увеличением различия в структурах по рассчитанным расстояниям.

4. Сравнение расчетов по модельным и реальным структурам показало, что реализация межфазных взаимодействий увеличивает разницу структур по методу локальных бинарных шаблонов при выбранных методах сравнения гистограмм: вклад межфазного взаимодействия меняет показатели сравнения в большую сторону.

5. Материалы, больше отличающиеся по величине объемного электрического сопротивления и его изменению при эксплуатационных воздействиях, показывают большую разницу расстояний Кульбака–Лейблера как для одноканальной, так и трёхканальной гистограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин (и др.) // Под ред. А.В. Герасимов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 311 с.
2. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М. : Химия, 1984. 240 с.
3. Минакова Н.Н. Моделирование процессов эксплуатационных воздействий для дисперсно-наполненных полимеров // Известия высших учебных заведений физика. 2000. Т. 43. № 1. С. 41–45.
4. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Текстуальный анализ дисперсной структуры композитных эластомеров с модифицированным углеродным наполнителем // Известия высших учебных заведений физика. 2002. Т. 45. № 2. С. 80–83.
5. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М. : Химия, 1991. 260 с.
6. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Низковольтные характеристики материала на основе каучука с углеродным наполнителем для объемных резисторов // Электричество. 1986. № 4. С. 64–66.
7. Минакова Н.Н. Оценка вклада агломерированного компонента в формирование электропроводности наполненных полимеров по сравнительным характеристикам микрофотографий структуры // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 147–153.
8. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск : ОАО «Техуглерод», 2004. 228 с.

9. Корнев, Ю.В. Управление энергетикой поверхности технического углерода с помощью модификации / Ю.В. Корнев, А.С. Лыкин, М.В. Швачич, Ю.А. Гамлицкий // Каучук и резина : междунар. конф. (20–27 окт. 2004, г. Москва). М. : НИИШП, 2004. С. 125.

9. Раздьяконова, Г.И. Влияние функционального состава технического углерода на межфазные слои в каучуковой среде / Г.И. Раздьяконова, Е.А. Киселева // Каучук и резина. 2013. № 3. С. 40–43.

10. Раздьяконова, Г.И. Получение и свойства дисперсного углерода. Омск : ОмГТУ, 2014. 236 с.

11. Фиалков А.С. Углеродистые материалы. М. : Энергия, 1979. 320 с.

12. Alpaslan N., Hanbay K. Multi-resolution intrinsic texture geometry-based local binary pattern for texture classification // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 54415–54430.

13. Рахимбаева Е.О. Анализ алгоритма локальных бинарных шаблонов в задаче классификации текстур // Вестник современных исследований. 2019. № 1.13 (28). С. 125–130.

14. Прэтт У. Цифровая обработка изображений ; Пер. с англ. М. : Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.

15. Гонсалес Р.С, Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2012. 1081 с.

16. Histogram Comparison // Open CV. URL : https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html (дата обращения 25.01.2023).

17. Постнов К.В. Компьютерная графика. М. : МГСУ, 2009. 249 с.

18. Xu M. Tighter Performance Bounds on Image Registration / M. Xu, P.K. Varshney // in Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2006). 2006. P. 777–780.

19. Shan C., Gong S., McOwan P.W. Facial expression based on local binary patterns: A comprehensive study // Image and Vision Computing. 27(6). 2009. P. 803–816.

Информация об авторах

Н. Н. Минакова – доктор физико-математических наук, профессор, Алтайский государственный университет.

REFERENCES

1. Lyukshin, B.A. [et al.]. (2017). Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes. edited by A.V. Gerasimov. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS. (In Russ.).
2. Gul, V.E. & Shenfil, L.Z. (1984). Electroconductive polymer compositions. M.: Chemistry. (In Russ.).
3. Minakova, N.N. (2000). Modeling of operational impact processes for dispersed-filled polymers. Izvestiya vysshikh uchebnykh institutov fizika. 43(1). 41-45. (In Russ.).
4. Minakova, N.N. & Ushakov, V.Ya. (2002). Textural analysis of the dispersed structure of composite elastomers with modified carbon filler. News of higher educational institutions of physics. 45(2). 80-

83. (In Russ.).

5. Lipatov, Yu.S. (1991). Physico-chemical bases of polymer filling. M.: Chemistry. (In Russ.).

6. Minakova, N.N., Skvirskaya, I.I. & Ushakov, V.Ya. (1986). Low-voltage characteristics of a rubber-based material with a carbon filler for volumetric resistors. *Electricity*. (4). 64-66. (In Russ.).

7. Minakova, N.N. (2022). Assessment of the contribution of the agglomerated component to the formation of the electrical conductivity of filled polymers by the comparative characteristics of micrographs of the structure. *Polzunovskiy Vestnik*. (1). 147-153. (In Russ.).

8. Ivanovskiy, V.I. (2004). Carbon black. Processes and devices. Omsk: JSC "Techuglerod". (In Russ.).

9. Kornev, Yu.V., Lykin, A.S., Shvachich, M.V. & Gamlitsky, Yu.A. (2004). Energy management of the carbon black surface by means of modification. Rubber and rubber : inter-dunar. conf. (October 20-27, 2004, Moscow). M. : NIISHP. (In Russ.).

9. Razdiakonova, G.I. & Kiseleva, E.A. (2013). The influence of the functional composition of carbon black on interphase layers in a rubber medium. *Rubber and rubber*. (3). 40-43. (In Russ.).

10. Razdyakonova, G.I. (2014). Obtaining and properties of dispersed carbon. Omsk: OmSTU. (In Russ.).

11. Fialkov, A.S. (1979). Carbon-graphite materials. M.: Energiya. (In Russ.).

12. Alpaslan, N. & Hanbai, K. (2020). A local

two-sided template based on the internal geometry of a texture with multiple resolutions for texture classification. *IEEE Access*. (8). 54415-54430. (In Russ.).

13. Rakhimbayeva, E.O. (2019). Analysis of the algorithm of local binary patterns in the problem of texture classification. *Bulletin of Modern Research*. 1.13 (28). 125-130. (In Russ.).

14. Pratt, U. (1982). *Digital image processing*: Translated from English. M.: Mir, Book 2. (In Russ.).

15. Gonzalez, R.S. & Woods, R.E. (2012). *Digital image processing*. Moscow: Technosphere. (In Russ.).

16. Comparison of histograms (2023). *OpenCV*. Retrieved from https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html. (In Russ.).

17. Postnov, K.V. (2009). *Computer graphics*. M.: MGSU. (In Russ.).

18. Xu, M. & Varshni, P.K. (2006). More stringent performance limitations when registering images in the process. *IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2006)*. 777-780.

19. Shan, K., Gong, S. & McOwen, P.U. (2009). Facial expression based on local binary patterns: a comprehensive study. *Computing images and visions*. 27(6). 803-816. (In Russ.).

Information about the authors

N.N. Minakova - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Altai State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.01.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 07 Jan 2023; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.