

Программная реализация алгоритмов сегментации и поиска зон деформации микроструктуры сплавов по их металлографическим изображениям

К.Ю. Андросов

Аннотация—В статье показано, что разработка эффективного алгоритма сегментации для металлографических изображений является актуальной задачей. Рассмотрен алгоритм mean shift (сдвига среднего), его недостатки. Для устранения недостатков предложена модификация алгоритма на основе агломеративной кластеризации. Данный алгоритм заключается в следующем: на первом этапе производится стандартная кластеризация методом mean shift с небольшим размером окна; затем вычисляется мощность каждой точки, являющейся центром кластера, и из этих точек формируется новый набор; затем производится кластеризация стандартным методом mean shift полученного набора. Последние три этапа повторяются до тех пор, пока кластеры не перестанут объединяться. Также предлагается алгоритм поиска зон деформации. С целью сокращения временных затрат на их поиск, предполагается сравнивать контуры отдельных зёрен металла или сплава с кругом или эллипсом. В рамках реализации, предложенных в статье алгоритмов, предлагается создать программный продукт, состоящий из двух компонентов: компонента поиска границ зёрен и компонента обнаружения деформации и зон деформации. Для каждого компонента описана программная архитектура, представлены результаты тестирования. На представленные в статье программные компоненты получены 2 авторских свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Ключевые слова—сегментация, структурно-цветовое пространство признаков, алгоритм mean shift, программный продукт.

I. ВВЕДЕНИЕ

На физико-механические и эксплуатационные свойства сплава преобладающее влияние оказывает его структура и фазовый состав, что в конечном счёте сказывается на надёжности и качестве изделий. Исследование сплава, в частности идентификация дефектов структуры, целиком сводится к анализу и интерпретации его изображения, а именно к сегментации и классификации полученных сегментов.

Статья получена 15 февраля 2022 г. Кирилл Юрьевич Андросов, Брянский государственный технический университет (androkirl@yandex.ru).

По этой причине и исходя из недостатков существующих подходов, целью данного исследования является поиск и программная реализация эффективного алгоритма разбиения металлографических изображений на фрагменты по цветовым признакам, т.е. их сегментации, с целью последующего поиска зон деформации [1,3,4,8].

II. АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ MEAN SHIFT (СДВИГА СРЕДНЕГО)

В качестве исходного алгоритма сегментации в разработанном в работе [1] структурно-цветовом пространстве был выбран алгоритм mean shift (сдвига среднего). Суть метода заключается в том, что задается функция оценки плотности распределения точек в пространстве признаков.

Далее для этих точек строится градиент ядра оценки плотности распределения и вычисляется вектор среднего сдвига, задаваемый как вектор наибольшего увеличения градиента.

Пусть имеется d размерное пространство признаков R , возьмем n точек в этом пространстве x_1, x_2, \dots, x_n . Для этих точек зададим оценку плотности распределения признаков методом Парзеновских окон:

$$\hat{f}_n = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right),$$

где h – размер окна, $K(x)$ – функция ядра. Она должна удовлетворять следующим правилам:

$$\int_{R^n} K(x) dx = 1, \quad \int_{R^n} xK(x) dx = 1; \\ \lim_{\|x\| \rightarrow \infty} \|x\|^d K(x) = 0.$$

Как правило $K(x)$ выглядит следующим образом:

$$K(x) = c_{k,d} k(\|x\|^2), \quad (4)$$

где $k(x)$ – функция ядра, $c_{k,d}$ – нормировочная константа.

В качестве ядер как правило используют следующие ядра: ядро Епаршникова, где

$$k_E = \begin{cases} 1-x, & \text{если } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{если } x > 1; \end{cases}$$

и, соответственно,

$$K_E(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} c_d^{-1} (d+2)(1-\|x\|^2), & \text{если } \|x\| \leq 1, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

и ядро Гаусса, где

$$k_N = \exp\left(-\frac{1}{2}x\right), x \geq 0;$$

и, соответственно

$$K_N = (2\pi)^{-\frac{d}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\|x\|^2\right).$$

Теперь функцию ядра оценки можно представить в виде:

$$\hat{f}_{h,K}(x) = \frac{c_{k,d}}{nh^d} \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \quad (1)$$

Первым шагом в анализе оценки плотности распределения $f(x)$ пространства признаков является поиск мод (точек максимума функции плотности распределения) плотности распределения. Моды располагаются среди нулей градиента $\nabla f(x) = 0$ и метод сдвига среднего является элегантным способом определения местоположения этих нулей, не оценивая самой плотности распределения.

Оценка производной плотности распределения проводится с помощью функции градиента и будет задаваться следующим образом:

$$\nabla \hat{f}_{h,K}(x) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^n (x_i - x) k'\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right).$$

Вводится функция производной ядра $g(x)$ равная $-k'(x)$, где предполагается, что $g(x)$ существует для всех $x \in [0, \infty)$. Через $G(x)$ обозначим новое ядро равно $c_{g,d}g(\|x\|^2)$. Теперь $g(x)$ подставим в (1) и получим выражение следующего вида:

$$\nabla \hat{f}_{h,K}(x) = \frac{2c_{g,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \right] \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x \right], \quad (2)$$

где предполагается что $\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)$ является положительным числом.

Первый множитель в (2) пропорционален оценке плотности распределения от x вычисленной с ядром $G(x)$:

$$\hat{f}_{h,G}(x) = \frac{c_{g,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \right];$$

$$m_{h,G}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x; \quad (3)$$

$$\nabla \hat{f}_{h,K}(x) = \hat{f}_{h,G}(x) \frac{2c_{g,d}}{nh^2} m_{h,G}(x); \quad (4)$$

$$m_{h,G}(x) = \frac{1}{2} h^2 c \frac{\nabla \hat{f}_{h,K}(x)}{\hat{f}_{h,G}(x)}.$$

Второй сомножитель в формуле (2) представляет собой сдвиг среднего $m_{h,G}(x)$ – разность между взвешенным средним, использующим значения ядра $g(x)$ в качестве весовых коэффициентов, и центром ядра x (3).

Формула (4) показывает, что сдвиг среднего, вычисленный с ядром $g(x)$, пропорционален оценке нормализованной производной эмпирической плотности вероятности, оцениваемой с помощью ядра $k(x)$. Поэтому сдвиг среднего всегда направлен по максимуму возрастания эмпирической плотности вероятности [2].

Последнее обстоятельство гарантирует сходимость этой оценки в точку с нулевой производной. Области с малыми значениями плотности вероятностей не представляют интереса, поэтому сдвиг среднего в таких областях большой. Возле локальных максимумов сдвиг малый и анализ более подробный. Из этого следует, что метод сдвига среднего – это метод адаптивного спуска по градиенту.

III. НЕДОСТАТКИ МЕТОДА MEAN SHIFT И ПРЕДЛАГАЕМАЯ ЕГО МОДИФИКАЦИЯ

Недостатками данного метода являются [5]:

- Невысокая скорость. Процедура вычисления вектора среднего сдвига требует больших вычислительных ресурсов.

- Чувствительность к размерам окна. Единственным параметром кластеризации методом mean shift является размер окна h . При анализе цветных изображений этот параметр представляется в виде вектора в d мерном пространстве признаков. Значения составляющих этого вектора оказывают существенное влияние на результаты сегментации. Существует большое количество методик выбора размера окна на основе статистических данных об изображении. Это позволяет избавиться от необходимости подбирать размеры окна экспериментально, но не решает саму проблему сильного влияния значений параметров на результаты сегментации притом, что форма их зависимости неоднозначна.

Для устранения данных недостатков предлагается следующий алгоритм: на первом этапе производится стандартная кластеризация методом mean shift с небольшим размером окна; затем вычисляется мощность каждой точки, являющейся центром кластера, и из этих точек формируется новый набор; затем производится кластеризация стандартным методом mean shift полученного набора. Последние три этапа повторяются до тех пор, пока кластеры не перестанут объединяться. Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 1. [6]

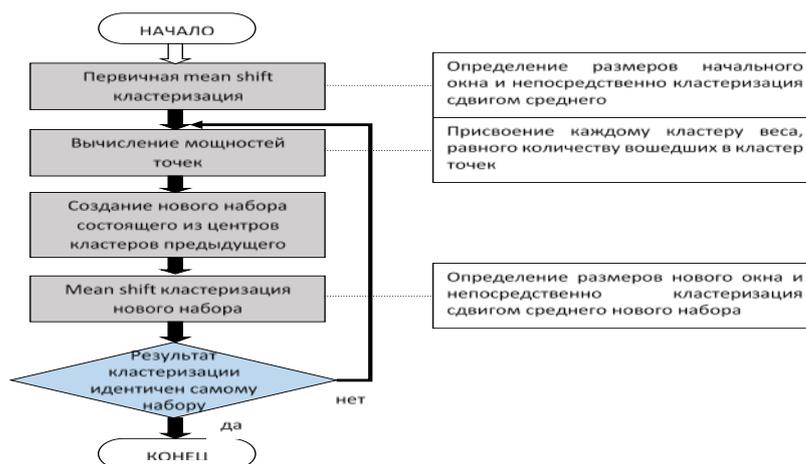


Рис.1. Блок-схема модифицированного алгоритма сдвига среднего

IV. АЛГОРИТМ ПОИСКА ЗОН ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотренный в разделе 1 подход может быть использован и для поиска зон деформации в металлах и сплавах. С целью сокращения временных затрат на их поиск, предполагается сравнивать контуры отдельных зёрен металла или сплава с кругом или эллипсом. Для этого находится центр тяжести контура с помощью следующих формул:

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$\frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

где x_1, \dots, x_n – положение точек контура по оси x , y_1, \dots, y_n – положение точек контура по оси y , а n количество точек контура.

Затем из найденного центра тяжести до всех точек контура формируется вектор для нахождения максимальной по длине оси.

После построения максимальной оси относительно её центра строится перпендикуляр до пересечения с границами зерна. Определяется расстояние от центра максимальной оси до точек пересечения и удвоенное значение меньшего из них принимается за длину минимальной оси. Если длина минимальной оси меньше максимальной на 20-30%, то внутри зерна можно

построить эллипс, который показывает, что оно имеет вытянутую структуру, и, следовательно, его следует считать деформированным, в противном случае можно построить круг, что означает, что зерно следует отнести к недеформированным, то есть нормальным.

Отдельным пунктом является поиск процента деформации зерна. Для нахождения этого числа необходимо построить два контура с одинаковой площадью – нормального и деформированного, затем сравнить длину оси нормального зерна с длиной большой оси деформированного. Полученное число и может быть принято в качестве оценки степени деформации.

V. АРХИТЕКТУРА ПРЕДЛАГАЕМОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

В рамках реализации, предложенных в работе алгоритмов, предлагается создать программный продукт, состоящий из двух компонентов: компонента поиска границ зёрен и компонента обнаружения деформации и зон деформации. Каждый из них требует своей архитектуры, а также разного подхода к тестированию. Поэтому, их стоит рассмотреть отдельно.

На рисунке 2 приведена архитектура компонента сегментации изображения.

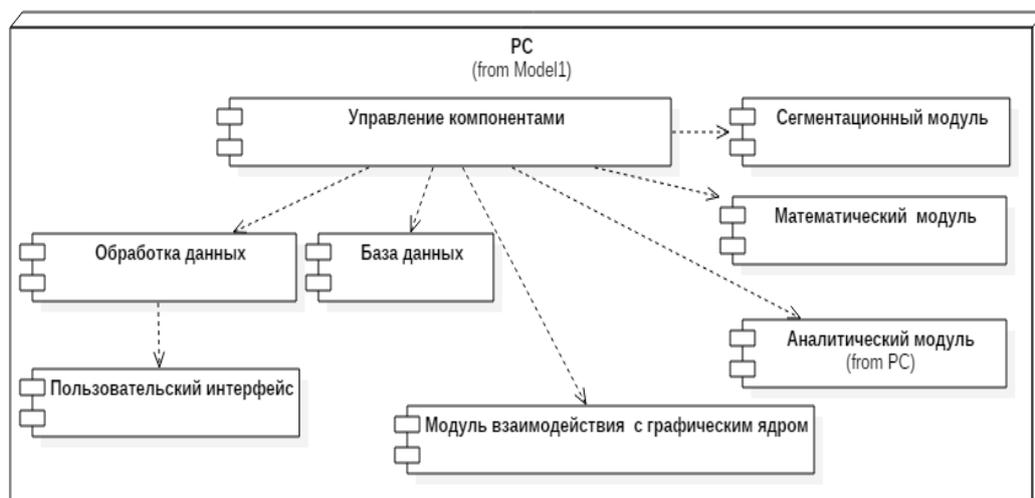


Рис. 2. Архитектура компонента сегментации [6]

Входной информацией для блока «Обработка данных» является исходное изображение. В качестве управляющего сигнала выступают некоторые глобальные настройки, такие как масштаб загружаемого изображения. В качестве механизма выступают алгоритм получения исходной матрицы пикселей и пользователь. Выходной информацией для блока один является изображение, представленное в виде матрицы пикселей.

Выходные данные из блока «Обработка данных» (исходная матрица пикселей) поступают посредством блока «Управления компонентами» в блок «Аналитический модуль», где происходит предобработка. В качестве управляющих сигналов выступают: параметры сглаживания шумов и параметры ликвидации ложных границ, где под ними подразумевается, как необходимость применения подобных процедур для исходного изображения, так и степень их интенсивности. В качестве механизма выступает пользователь и алгоритм предобработки изображения. Таким образом, на выходе блока мы имеем предобработанную матрицу пикселей.

Выходные данные блока «Аналитический модуль» (предобработанная матрица пикселей) поступают на вход блока «Математический модуль», где на основании этих данных строится пространство признаков изображения. В качестве управляющих сигналов выступают параметры цветовых и структурных признаков, вводимые в [1]. Механизмом выступает пользователь и алгоритм построения пространства признаков. На выходе блока три мы получаем распределение пикселей в пространстве признаков.

Выходные данные блока «Математический модуль» поступают на вход блока «Сегментационный модуль», где на основании полученного распределения производится сегментация. В качестве управляющих сигналов выступают весовые коэффициенты для текстурной и цветовой метрик, и размер начального окна сегментации. Механизмом выступает пользователь и непосредственно алгоритм сегментации. На выходе блока мы имеем сегментированное изображение.

На рисунке 3 приведена архитектура компонента поиска зон деформации [7].

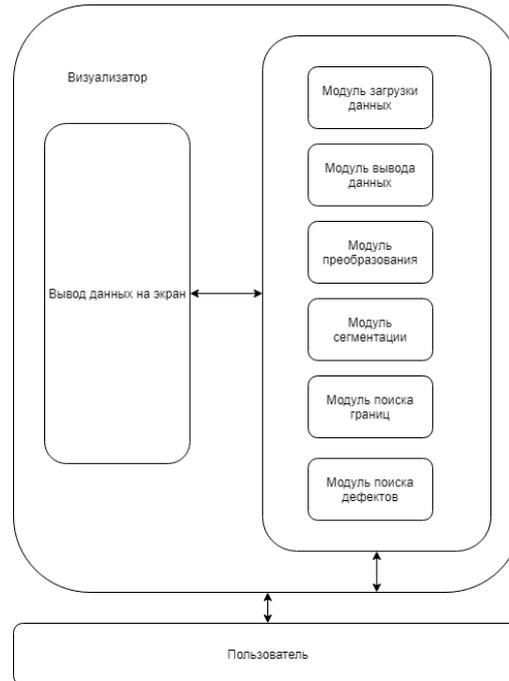


Рис. 3. Архитектура компонента поиска зон деформации [7]

Компонент *Пользователь* выполняет роль управляющего, который производит манипуляции с данным приложением.

Компонент *GUI* выполняет роль графического интерфейса для взаимодействия пользователя и приложения.

Компонент *Модуль загрузки данных* позволяет считывать данные полученные от пользователя (изображение).

Компонент *Модуль вывода данных* позволяет выводить изображения на экран.

Компонент *Модуль преобразования* осуществляет преобразование изображения для дальнейшей работы.

Компонент *Модуль сегментации* осуществляет преобразование изображения в сегментированное.

Компонент *Модуль поиска границ* осуществляет поиск границ сегментов.

Компонент *Модуль поиска дефектов* осуществляет поиск дефектных границ.

Для первого компонента проводилась проверка на сегментацию изображения с пониженной яркостью; способность программы сегментировать максимальное количество объектов; внесение информации в базу данных после сегментации. На рисунках 4-6 показана работа компонента поиска границ зерён для изображений с пониженной яркостью, а также с разными размерами сегмента (100 и 1000).



Рис. 4. Сегментация изображения с пониженной яркостью

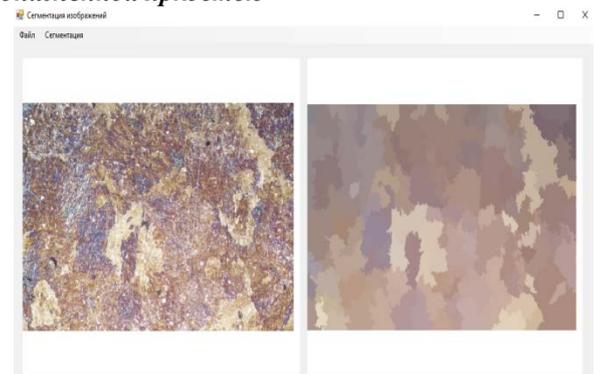


Рис. 5. Результат сегментации изображения с размером сегмента «1000»



Рис. 6. Результат сегментации изображения с размером сегмента «100»

Для компонента поиска зон деформация выполнена:

- проверка на корректность запуска программы;
- проверка на корректность загрузки изображения;
- проверка на корректность сегментирования;
- проверка на корректность выполнения поиска контуров;
- проверка на правильность работы с выделенными контурами.

На рис. 7. показан результат работы компонента поиска зон деформации на реальном металлографическом изображении.

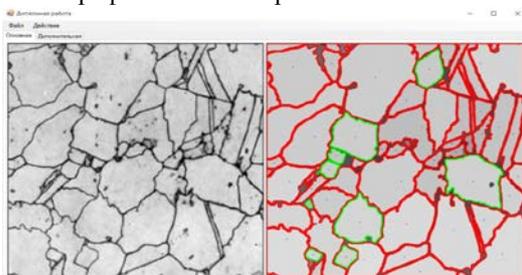


Рис. 7. Корректная работа алгоритма сегментации на реальном металлографическом изображении.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

После проведения тестов, подтверждены корректность и стабильность функционирования обоих компонентов разработанной программной системы. Таким образом, можно сделать вывод о полном соответствии полученного продукта функциональным требованиям. На представленные в статье программные компоненты получены 2 авторских свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [6,7].

Перспективным направлением дальнейших исследований является проведение патентного обзора российских и зарубежных исследований в подклассе МПК G06K 9/00 с целью поиска трендов в средствах интеллектуального анализа данных в сфере изучения алгоритмов сегментации в структурно-цветовых

пространствах признаков, построенных на основе полихроматического растрового изображения, используя как количественное, так и качественное представление интерпретируемых данных.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1]. Androsov, K.Yu. Formation of the feature space to determine the grain boundaries of the structural components of the alloy by the polychromatic raster image of its microstructure / K.Yu. Androsov, A.N. Gorbunov, S.V. Davydov // GraphiCon 2018 - 28th International Conference on Computer Graphics and Vision. – 2018. – С. 90-93.
- [2]. Fukunaga, K. The Estimation of the Gradient of a Density Function, with Applications in Pattern Recognition / Fukunaga K., Hostetler L.D. // IEEE Trans. Information Theory. – 1975. – № 21. – Р. 32-40.
- [3]. Круглов, А.В. Реализация интерактивной сегментации для сенсорных устройств на базе ОС ANDROID / А.В. Круглов, И.Д. Югфельд // Современные наукоемкие технологии. – 2016. - №2. – С. 229-234.
- [4]. Форсайт, Д. Компьютерное зрение: Современный подход / Д. Форсайт Ж. Понс. – М.:Вильямс, 2004. – 928 с.
- [5]. Хашин, С.И. Оценка качества сегментации изображения / С.И. Хашин // Вестник ивановского государственного университета. Серия: естественные, общественные науки. – 2010. - №2. – С. 112-117.
- [6]. Марченков, Д.А. Программа разбиения изображений на фрагменты по цветовым признакам/ Д.А. Марченков, К.Ю. Андросов, А.Н. Горбунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019660261, 05.08.2019. Заявка № 2019619409 от 29.07.2019.
- [7]. Евсютин, А.М. Программа поиска структурных дефектов сплава по полихроматическому растровому изображению его микроструктуры / А.М. Евсютин, К.Ю. Андросов, А.Н. Горбунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019660270, 05.08.2019. Заявка № 2019619347 от 29.07.2019.
- [8]. Спасенников В.В. Феномен цветосприятия в эргономических исследованиях и цветоконсультировании // Эргодизайн. – 2019. - №2(04). – С. 51-60. DOI: 10.30987/article_5cb22163c8b6b7.59336480.
- [9]. Spasennikov, V. Ergonomic factors in patenting computer systems for personnel's selection and training / V. Spasennikov, K. Androsov, G. Golubeva // CEUR Workshop Proceedings : 30, Saint Petersburg, 22–25 сентября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – EDN MRWCZX.

Software implementation of algorithms for segmentation and search for deformation' zones of the alloys' microstructure based on their metallographic images

Kirill Androsov

Abstract— The article shows that the development of an effective segmentation algorithm for metallographic images is an urgent task. The mean shift algorithm and its disadvantages are considered. To eliminate the shortcomings, a modification of the algorithm based on agglomerative clustering is proposed. This algorithm is as follows: at the first stage, standard clustering is performed by the mean shift method with a small window size; then the power of each point that is the center of the cluster is calculated, and a new set is formed from these points; then clustering is performed using the standard mean shift method of the resulting set. The last three stages are repeated until the clusters stop merging. An algorithm for finding deformation zones is also proposed. In order to reduce the time spent on their search, it is assumed to compare the contours of individual grains of metal or alloy with a circle or ellipse. As part of the implementation of the algorithms described in the article, it is proposed to create a software product consisting of two components: a component for searching grain boundaries and a component for detecting deformation and deformation zones. The software architecture is described for each component, and the test results are presented. For the software components presented in the article, 2 author's certificates of computer program's registration were obtained.

Keywords—segmentation, structural and color space of features, mean shift algorithm, software product.

REFERENCES

- [1]. Androsov, K.Yu. Formation of a feature space for determining grain boundaries of structural components of an alloy from a polychromatic raster image of its microstructure / K.Yu. Androsov, A.N. Gorbunov, S.V. Davydov // *Graphicon 2018 - 28th International Conference on Computer Graphics and Vision*. - 2018. - pp. 90-93.
- [2]. Fukunaga, K. Estimation of the gradient of the density function with applications in pattern recognition / Fukunaga, K., Hostetler, L.D. // *IEEE Trans. Information theory*. - 1975. - No. 21. - pp. 32-40.
- [3]. Kruglov, A.V. Implementation of interactive segmentation for touch devices based on Android OS / A.V. Kruglov, I.D. Yugfeld // *Modern high-tech technologies*. - 2016. - No.2. - pp. 229-234.
- [4]. Foresight, D. *Computer vision: A modern approach* / D. Foresight J. Pons. - M.: Williams, 2004. - 928 p.
- [5]. Khashin, S.I. Assessment of image segmentation quality / S.I. Khashin // *Bulletin of the Ivanovo State University. Series: natural, social sciences*. - 2010. - No. 2. - pp. 112-117.
- [6]. Evsyutin, A.M. Program for searching for structural defects of an alloy based on a polychromatic raster image of its microstructure / A.M. Evsyutin, K.Yu. Androsov, A.N. Gorbunov // *Certificate of registration of a computer program RU 2019660270*, 05.08.2019. Application No. 2019619347 dated 29.07.2019.
- [7]. Marchenkov, D.A. The program of splitting images into fragments by color characteristics/ D.A. Marchenkov, K.Yu. Androsov, A.N. Gorbunov // *Certificate of registration of the computer program RU 2019660261*, 05.08.2019. Application No. 2019619409 dated 29.07.2019.
- [8]. Spasennikov V.V. The phenomenon of color perception in ergonomic research and color consulting // *Ergodesign*. - 2019. - №2(04). - Pp. 51-60. DOI: 10.30987/article_5cb22163c8bb6b7.59336480.
- [9]. Spasennikov, V. Ergonomic factors in patenting computer systems for personnel's selection and training / V. Spasennikov, K. Androsov, G. Golubeva // *CEUR Workshop Proceedings : 30*, Saint Petersburg, 22–25 сентября 2020 года. - Saint Petersburg, 2020. - EDN MRWCZX.