

Сравнение изображений картин по информативным фрагментам*

Д. М. Мурашов¹, А. В. Березин², Е. Ю. Иванова²
 d_murashov@mail.ru, berezin_alex@mail.ru

¹Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, Москва, РФ; ²Государственный исторический музей, Москва, РФ

Рассматривается задача сравнения изображений картин по информативным фрагментам для целей атрибуции произведений живописи. Для сравнения выбираются фрагменты со сходным содержанием. Используемые текстурные признаки описывают фактуру картины и являются характеристикой стиля живописи художника. В качестве признаков применяются гистограммы локальной ориентации хребтов полутонового рельефа изображения и локальной ориентации простых окрестностей. Разработана процедура извлечения признаков. Для сравнения информативных фрагментов применяется теоретико-информационная мера различия на основе дивергенции Кульбака-Лейблера. Предлагается методика сравнения изображений картин по значениям меры различия фрагментов. Методика тестировалась на изображениях портретов, написанных в XVIII–XIX вв. Результаты экспериментов показали возможность использования разработанной методики в технико-технологических исследованиях для целей атрибуции.

Ключевые слова: *сравнение фактуры картин; информативные фрагменты; ориентация хребтов изображения; ориентация простых окрестностей; мера различия изображений*

Comparing images of paintings using informative fragments*

D. M. Murashov¹, A. V. Berezin², E. Yu. Ivanova²

¹Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, Russia; ²State Historical Museum, Moscow, Russia

The problem of comparing images for the purpose of attribution of fine-art paintings is considered. Features used in this work describe texture of a painting and characterize an artistic style of a painter. The feature space includes a histogram of orientation angles of grayscale image ridges and a histogram of simple neighborhood orientation based on the local structure tensor. A procedure for feature extraction is developed. An information-theoretical dissimilarity measure based on Kullback–Leibler divergence is used for comparing informative image fragments. A method for comparing images of paintings using dissimilarity measure values between fragments is proposed. The method is tested on images of portraits created in XVIII–XIX centuries. The paintings are compared using three fragments segmented in a particular image. The results of the experiments showed that the difference between portraits painted by the same artist is substantially smaller than one between portraits painted by different authors. The proposed technique may be used as a part of technotechnological description of fine art paintings for attribution. The future research will be aimed at extending feature space, developing a technique for locating informative fragments, augmenting image dataset, and testing the developed method on augmented dataset.

Keywords: *comparing texture of paintings; informative image fragments; ridge orientation; orientation of simple neighborhood; dissimilarity measure*

Введение

Работа посвящена сравнению изображений картин по текстурным признакам, характеризующим стиль живописи художника, для целей атрибуции. Компьютерные методы, применяемые в атрибуции, основаны на сравнении количественных описаний манеры живописи картины с неизвестной атрибуцией с описаниями аутентичных работ. Анализ публикаций по компьютерной атрибуции показал, что решение задачи включает несколько основных этапов. Схема решения показана на рис. 1. На этапе предварительной обработки на оцифрованных изображениях компенсируются искажения, возникающие при съемке; изображения масштабируются для получения одинакового разрешения. Признаки вычисляются на относительно небольших фрагментах картин. Для этого исследуемое изображение и изображения с известной атрибуцией разделяются на фрагменты, из которых извлекаются признаки. На следующем этапе вычисляются значения локальных (в пределах одного фрагмента) признаков. Могут вычисляться и глобальные признаки по всему изображению. Размерность признакового пространства может быть достаточно велика. Поэтому на следующем этапе для понижения размерности производится агрегирование признаков в пределах отдельных фрагментов. Для понижения размерности признакового пространства могут применяться стандартные методы [1], [2], [3]. После сокращения размерности фрагменты исследуемых изображений сравниваются с фрагментами изображений аутентичных картин по выбранной мере сходства или различия. Расстояние между картинками определяется агрегированием расстояний между фрагментами. Если изображения картин не дефрагментировались, то расстояния вычисляются непосредственно по сформированным векторам признаков. Далее на основе полученных расстояний формулируются атрибуционные решения.

В данной работе исследуются изображения портретов. В соответствии с рекомендациями искусствоведов [4] предлагается в качестве образцов для сравнения использовать группу мазков, формирующих какую-либо деталь лица. В работе [5] для решения задачи атрибуции портретных миниатюр сравнивались однотипные фрагменты изображений лиц. Фрагменты выделялись с использованием геометрической модели человеческого лица. В настоящем исследовании также будут использованы однотипные фрагменты изображений лиц. Однако, рассматриваемые портреты существенно отличаются по размеру от миниатюр, исследуемых в [5]. Поэтому будут анализироваться фрагменты, отличные от анализируемых в работе [5]. Пример исследуемых в данной работе однотипных фрагментов изображений портретов приведен на рис. 2.

Задача формулируется следующим образом. Пусть U_j , $j = 1, \dots, J$ – изображения картин J разных авторов, $U_j : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Пусть на каждом изображении U_j выделено I информативных фрагментов u_j^i , $i = 1, \dots, I$; $u_j^i : \bar{\Omega}_{ji} \rightarrow \mathbb{R}$, где $\bar{\Omega}_{ji} \subset \mathbb{R}^2$ – некоторая замкнутая область в \mathbb{R}^2 . Пусть информативный фрагмент u_j^i типа i изображения U_j характеризуется некоторым S -мерным вектором признаков $\mathbf{x}_j^i = [x_{j1}^i, x_{j2}^i, \dots, x_{js}^i]^T$, $x_{js}^i = \gamma_s(u_j^i)$, $\gamma_s : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $s = 1, \dots, S$. Тогда различие изображений U_j и U_k относительно выбранных признаков и выбранной меры d выражается модулем вектора расстояний между соответствующими однотипными фрагментами:

$$|\mathbf{D}_{jk}| = |\mathbf{D}_{jk}(U_j, U_k)| = \left| [d_{jk}^1, d_{jk}^2, \dots, d_{jk}^I]^T \right| = \sqrt{\sum_{i=1}^I (d_{jk}^i)^2}, \quad (1)$$

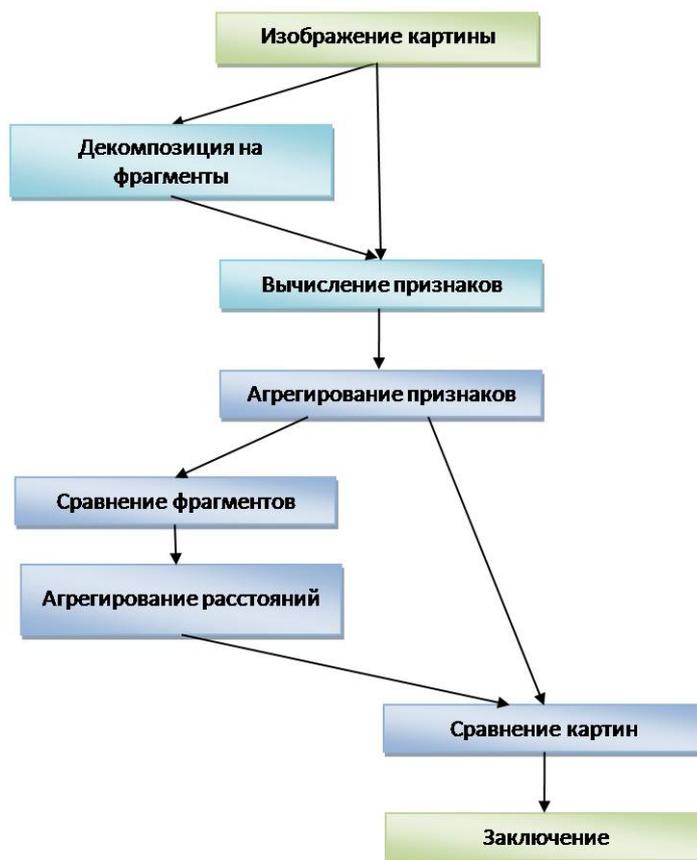


Рис. 1. Схема решения задач атрибуции произведений живописи методами компьютерного анализа изображений

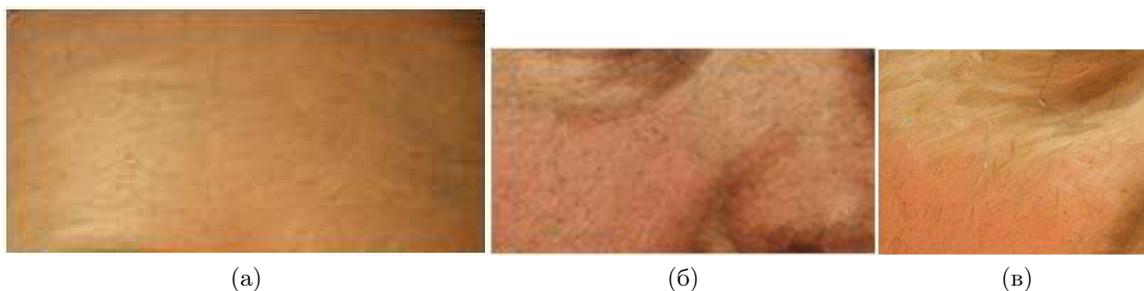


Рис. 2. Изображения фрагментов портретов: (а) лоб; (б) нос и часть щеки; (в) часть щеки

где D_{jk} — I -мерный вектор расстояния между изображениями, d_{jk}^i — расстояние между однотипными фрагментами u_j^i и u_k^i :

$$d_{jk}^i = d(u_j^i, u_k^i) = d(x_j^i, x_k^i). \quad (2)$$

Пусть предъявлено изображение картины неизвестного автора U_l , $l = J + 1$. Требуется найти изображение U_m (и, соответственно, автора), которое обеспечивает минимальное

расстояние D_{ml} :

$$U_m = \arg \min_j (|D_{jk}(U_j, U_l)|), \quad (3)$$

но не превышает некоторого порогового значения

$$|D_{ml}| < T. \quad (4)$$

Если $|D_{ml}| \geq T$, то будем считать, что ни один из имеющихся аутентичных образцов не соответствует по стилю живописи предъявленному образцу. Необходимо выбрать значение порога T , обеспечивающее правильное решение.

Исходные данные

Исходными данными являются цветные изображения фрагментов картин (портретов), выполненных разными художниками XVIII–XIX вв. Изображения фиксируются цифровой фотокамерой. Размеры фрагментов (например, лиц) составляют 4272×2848 пикселей. Размеры используемых в данной работе информативных областей составили от 990×814 до 1800×1000 пикселей. Разрешение составило примерно 200 точек на 1 сантиметр, что соответствует качеству исходных данных для такого рода исследований. Так в аналогичных работах [1, 6, 7] исследовались изображения с разрешением 196 точек на дюйм. На полученных изображениях корректировались искажения, обусловленные процессом съемки. На изображениях лица имеют одинаковую пространственную ориентацию и схожее расположение источника света. Картины в той или иной степени подвергались реставрационным вмешательствам. Признаки должны извлекаться из фрагментов картин, на которых сохранилась авторская живопись. Поэтому необходимо выделить и исключить области нарушения авторского красочного слоя (записей). Для локализации записей применяется метод, разработанный в [8, 9].

Процедура вычисления признаков

В работе [10] было сформировано признаковое описание фактуры картин, в состав которого включены гистограмма направлений хребтов полутоновых изображений мазков и гистограмма локальной ориентации простых окрестностей на изображении фрагмента картины. Первый признак формируется на основе вторых частных производных, а второй — на основе первых частных производных от функции, описывающей полутоновый рельеф изображения по пространственным координатам. Процедура вычисления признаков состоит из этапов предварительной обработки изображений и собственно вычисления признаков. При этом нужно исключить влияние сетки кракелюра на значения признаков. Нужно сформировать маску сетки кракелюра и исключить области под маской при вычислении признаков. Формирование маски кракелюра включает шаги: (а) применение морфологической операции «черный колпак»; (б) пороговая бинаризация с адаптивным порогом полученного на предыдущем шаге изображения; (в) фильтрация связанных компонент по площади. Этап предварительной обработки для получения гистограммы направлений хребтов полутонового рельефа фрагментов картин включает следующие шаги: (а) расширение динамического диапазона полутонов изображения; (б) формирование маски кракелюра; (в) размывание изображения фильтром Гаусса при $\sigma = 2$; (г) выделение хребтов с помощью алгоритма, описанного в [11]; (д) очистка изображения хребтов операциями математической морфологии [12]; (е) дефрагментация хребтов на непересекающиеся связанные компоненты; (ж) фильтрация связанных компонент по размеру; (з) удаление связанных компонент под маской. Угол ориентации осей инерции связанных компонент хребтов вычисляется по формуле [13]:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu_{1,1}}{\mu_{2,0} - \mu_{0,2}}, \quad (5)$$

где $\mu_{i,j}$ — компоненты тензора инерции объекта

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mu_{2,0} & -\mu_{1,1} \\ -\mu_{1,1} & \mu_{0,2} \end{bmatrix}.$$

По вычисленным значениям угла θ формируется гистограмма, которая является признаком фрагмента.

Предварительная обработка при получении гистограммы локальной ориентации простых окрестностей представляет собой последовательность шагов: (а) расширение динамического диапазона полутонов изображения; (б) формирование маски кракелюра; (в) прореживающая выборка с коэффициентом 2; (г) размывание изображения фильтром Гаусса при $\sigma = 2$ для размеров анализируемых изображений. Угол локальной ориентации φ окрестности в точках, не попавших под маску кракелюра, определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu_{f1,1}}{\mu_{f2,0} - \mu_{f0,2}}, \quad (6)$$

где $\mu_{fi,j}$ — компоненты структурного тензора

$$\boldsymbol{\mu}_f = \begin{bmatrix} \mu_{f2,0} & -\mu_{f1,1} \\ -\mu_{f1,1} & \mu_{f0,2} \end{bmatrix}.$$

По значениям угла φ , найденным в каждой точке фрагмента изображения с учетом маски, формируется гистограмма, которая характеризует исследуемый фрагмент.

Сравнение изображений

Для сравнения фрагментов изображений произведений живописи по признакам применяются методы статистического анализа [7], методы кластерного анализа и распознавания [1, 6]. В работе [10] была показана эффективность сравнения фрагментов изображений произведений живописи, представленных признаками, описанными выше, с помощью теоретико-информационной меры различия, предложенной в [3]. Теоретико-информационная мера различия формируется на основе дивергенции Кульбака–Лейблера в виде следующего выражения:

$$D_{KL} = \frac{1}{2} \left(\sum_{\psi \in A} p_{\Psi}(\psi) \log \left(\frac{p_{\Psi}(\psi)}{q_{\Psi}(\psi)} \right) + \sum_{\psi \in A} q_{\Psi}(\psi) \log \left(\frac{q_{\Psi}(\psi)}{p_{\Psi}(\psi)} \right) \right), \quad (7)$$

где $p_{\Psi}(\psi)$ и $q_{\Psi}(\psi)$ — вероятности того, что значения углов ориентации векторов на сравниваемых фрагментах принимают значение ψ ; A — алфавит Ψ . В соответствии с типовой схемой процесса анализа изображений (см. рис. 1), значения меры различия, вычисленные по отдельным фрагментам, комбинируются по формуле (1) для определения расстояния между изображениями картин. Для поиска среди картин с известной атрибуцией картины, схожей по выбранному набору признаков с предъявленной картиной с неизвестным авторством, необходимо вычислить все расстояния $|D_{jl}|$ и определить изображение U_m , удовлетворяющее условиям (3) и (4).

Порог T в условии (3) предлагается определять следующим образом. Пусть значение расстояния $|D_{jk}|$ между изображениями картин одного автора с номером n является случайной величиной Z_n с нормальным законом распределения. Пусть m_{Z_n} – среднее значение, а σ_{Z_n} – среднеквадратическое отклонение Z_n . Тогда порог расстояния определим следующим образом:

$$T = m_{Z_n} + w_n \sigma_{Z_n}, \quad (8)$$

где w_n – заданный коэффициент. Если каждый из авторов представлен только одной аутентичной работой, то в этом случае предполагается, что значение расстояния $|D_{jk}|$ между изображениями картин является случайной величиной Y с нормальным законом распределения, средним значением m_Y и среднеквадратическим отклонением σ_Y . Тогда порог T_1 в условии (4) определим как

$$T = m_Y + w_Y \sigma_Y, \quad (9)$$

где w_Y – заданный коэффициент.

Вычислительный эксперимент

В эксперименте исследовались изображения трех портретов кисти Ф. Рокотова и четырех портретов других авторов XVIII–XIX вв. На изображениях портретов выделены по три однотипных фрагмента: «лоб», «нос» и «щека» (см. рис. 2). Для каждого фрагмента получены гистограммы величин (5), (6). Гистограммы сравнивались с помощью выражения для меры (7) вычислены расстояния (2) между однотипными фрагментами изображений. Значения попарных расстояний между однотипными фрагментами изображений картин приведены в табл. 1-3. В таблицах через R_1 , R_2 и R_3 обозначены три портрета кисти Ф. Рокотова; M , F , Al , U – портреты, выполненные другими художниками. Значения расстояний между изображениями картин, вычисленные по данным табл. 1-3, представлены в табл. 4.

По данным табл. 4 определены значения порогов 8 и 9 для заключения о схожести манеры живописи. Для изображений произведений одного автора (R_1 – R_3) значение порога T , определяемого выражением (8), составляет $T = 0,171$ при $m_{Z_1} = 0,127$, $w_1 = 3$ и $\sigma_{Z_1} = 0,0147$. Значение порога T_1 (9) для авторов, представленных одним аутентичным произведением, равен $T_1 = 0,1849$ при $m_Y = 0,439$, $w_Y = -1,1$ и $\sigma_Y = 0,231$. Полученные значения порогов не превышают минимального из значений расстояний между картинами разных авторов в табл. 4. Результаты, представленные в табл. 1–4, показали: (1) расстояния между соответствующими фрагментами картин Ф. Рокотова R_1 , R_2 и R_3 меньше, чем расстояния до картин других авторов; (2) фрагменты «лоб» на картинах R_1 и F , R_3 и F , U и F , M и Al достаточно близки относительно используемых признаков; (3) расстояния между картинами одного автора, вычисленные по трем фрагментам, меньше, чем расстояние между картинами, написанными разными художниками.

Заключение

Рассмотрена задача сравнения изображений картин по информативным фрагментам для целей атрибуции произведений живописи. Для сравнения картин использованы признаки, выбранные авторами в работе [10]. Разработана процедура извлечения текстурных

Таблица 1. Значения расстояний между фрагментами «лоб»

Картина	R_1	R_2	R_3	M	F	Al	U
R_1	0,	0,0436	0,0459	0,5837	0,0675	0,4448	0,1011
R_2	0,0436	0	0,0573	0,6487	0,1100	0,5148	0,1381
R_3	0,0459	0,0573	0	0,4633	0,0574	0,3259	0,0693
M	0,5837	0,6487	0,4633	0	0,4202	0,0498	0,3503
F	0,0675	0,1100	0,0574	0,4202	0	0,2712	0,0429
Al	0,4448	0,5148	0,3259	0,0498	0,2712	0	0,2198
U	0,1011	0,1381	0,0693	0,3503	0,0429	0,2198	0

Таблица 2. Значения расстояний между фрагментами «нос»

Картина	R_1	R_2	R_3	M	F	Al	U
R_1	0	0,0703	0,0678	0,5154	0,1252	0,1972	0,1525
R_2	0,0703	0	0,0903	0,4701	0,1202	0,1740	0,1461
R_3	0,0678	0,0903	0	0,5067	0,1660	0,2094	0,1631
M	0,5154	0,4701	0,5067	0	0,4115	0,1922	0,3531
F	0,1252	0,1202	0,1660	0,4115	0	0,1452	0,2217
Al	0,1972	0,1740	0,2094	0,1922	0,1452	0	0,1992
U	0,1525	0,1461	0,1631	0,3531	0,2217	0,1992	0

Таблица 3. Значения расстояний между фрагментами «щека»

Картина	R_1	R_2	R_3	M	F	Al	U
R_1	0	0,0811	0,0898	0,3875	0,1374	0,2268	0,1602
R_2	0,0811	0	0,0957	0,2864	0,1176	0,1721	0,1219
R_3	0,0898	0,0957	0	0,3429	0,1947	0,2431	0,1573
M	0,3875	0,2864	0,3429	0	0,4022	0,1878	0,1806
F	0,1374	0,1176	0,1947	0,4022	0	0,1666	0,1877
Al	0,2268	0,1721	0,2431	0,1878	0,1666	0	0,1355
U	0,1602	0,1219	0,1573	0,1806	0,1877	0,1355	0

признаков, характеризующих стиль живописи художника. Предложена методика сравнения изображений картин по значениям теоретико-информационной меры различия фрагментов. Разработанные процедура и методика протестированы на изображениях портретов, написанных в XVIII–XIX вв. В вычислительном эксперименте картины сравнивались по трем однотипным фрагментам. Результаты эксперимента показали существенное различие в значениях расстояний между картинами, написанными одним автором, и картинами разных авторов. Предложенные процедура извлечения признаков и методика сравнения изображений могут быть использованы в качестве одного из видов технико-технологических исследований картин для целей атрибуции. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение признакового описания фрагментов картин, разработку методов поиска информативных фрагментов, увеличение базы изображений и тестирование разработанной методики на большем объеме данных.

Таблица 4. Значения расстояний между изображениями картин

Картина	R_1	R_2	R_3	M	F	AI	U
R_1	0	0,1158	0,1215	0,8698	0,1977	0,5368	0,2433
R_2	0,1158	0	0,1436	0,8507	0,2009	0,5700	0,2351
R_3	0,1215	0,1436	0	0,7675	0,2622	0,4573	0,2370
M	0,8698	0,8507	0,7675	0	0,7125	0,2733	0,5292
F	0,1977	0,2009	0,2622	0,7125	0	0,3499	0,2936
AI	0,5368	0,5700	0,4573	0,2733	0,3499	0	0,3261
U	0,2433	0,2351	0,2370	0,5292	0,2936	0,3261	0

Литература

- [1] Johnson C. R., Hendriks E., Berezhnoy I. J., Brevedo E., Hughes S. M., Daubechies I., Li J., Postma E., Wang J. Z. Image processing for artist identification (Computerized analysis of Vincent van Gogh's painting brushstrokes) // *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2008. Vol. 25. No. 4. Pp. 37–48.
- [2] Lyu S. Rockmore D. Farid H. Digital techniques for art authentication. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004. Vol. 87. No. 7. Pp. 1062–1078.
- [3] Hughes J. M. Dong Mao Rockmore D. N. Yang Wang Qiang Wu. Empirical mode decomposition analysis for visual stylometry // *TPAMI*. IEEE computer Society Digital Library, 2012. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TPAMI.2012.16>.
- [4] Ignatova N. S. Analysis of oil painting textures // *Fundamentals of Oil painting Examination. The guidelines*. Moscow: I. E. Grabar' restoration Centre, 1994. Issue 1. Pp. 15–26. [In Russian.]
- [5] Sablatnig R. Kammerer P. Zolda E. Structural Analysis of Paintings Based on Brush Strokes. // *Proc. of SPIE Scientific Detection of Fakery in Art*, SPIE, 1998. Vol. 3315. Pp. 87–98.
- [6] Polatkan G., Jafarpour S., Brasoveanu A., Hughes S., Daubechies I. Detection of forgery in paintings using supervised learning) // *ICIP2009*. IEEE, 2009. Pp. 2921–2924.
- [7] Li J. Yao L. Hendriks E. Wang J. Z. Rhythmic brushstrokes distinguish van Gogh from his contemporaries: Findings via automated brushstroke extraction // *TPAMI*. IEEE, 2012. Vol. 34. No. 6. Pp. 1159–1176.
- [8] Murashov D. M. Combined approach to localization of differences for multimodal images // *Informatics and Applications*. Moscow: TORUS PRESS, 2012. Vol. 6. No. 1. Pp. 122 - 131. [In Russian.]
- [9] Murashov D. Localization of differences between multimodal images on the basis of an information-theoretical measure // *Pattern Recognition Image Analysis*. Pleiades Publishing, 2014. Vol. 24. No. 1. Pp. 126–136.
- [10] Murashov D. M., Berezin A. V., Ivanova Y. Yu. Composing feature description of paintings texture // *J. Machine Learning Data Analysis*. Moscow: CC RAS, 2013. Vol. 1. No. 6. Pp. 779–786. [In Russian.]
- [11] Eberly D. Ridges in image and data analysis. — Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 213 p.
- [12] Soille P. 2004. Morphological image analysis: Principles and applications. — Berlin: Springer-Verlag. 314 p.
- [13] Jahne B. Digital Image Processing. — 6th ed. — Berlin: Springer-Verlag, 2005. 584 p.