

Алгоритм сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска дефектов

С. В. Еремеев¹ ✉, С. А. Романов²

¹ Муромский институт ФГБОУ ВО Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ул. Орловская 23, г. Муром 602264, Российская Федерация

² ООО «СимбирСофт» пр. Нариманова 1, г. Ульяновск 432001, Российская Федерация

✉ e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является разработка алгоритма сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска и классификации дефектов. Алгоритм направлен на повышение качества производимой продукции на предприятиях с непрерывным производством (металлургия, деревообрабатывающая промышленность и другие).

Методы. Для сегментации изображения предлагается установить связи между пикселями изображения. В дальнейшем, в процессе итерационного разрыва связей по мере увеличения их весов пиксели будут объединяться в группы, называемые дырами. Пиксели, объединенные в единую группу, имеют как свои первоначальные характеристики, так и общие характеристики для всей группы, а также изменяют веса своих связей с представителями других групп. Таким образом, образуется история формирования отдельных групп пикселей, которые можно обозначить в виде сегментов с временной характеристикой изменения.

Результаты. Итогом проведенного исследования является разработка алгоритма, предназначенного для поиска и классификации дефектов различных материалов. Разработан оптимальный алгоритм применения принципа персистентной гомологии к изображениям, проанализированы и выбраны факторы, определяющие переходные границы объектов изображения. Алгоритм сегментации опробован на изображениях металла, полученных с листопрокатного оборудования. Показаны результаты сравнения работы предложенного алгоритма с алгоритмами сегментации *k-means* и *Mean-Shift* при различных параметрах.

Заключение. Применение персистентной гомологии в задачах сегментации изображений может позволить создать инструмент, применимый к материалам с различной структурой без необходимости существенных изменений. Программная реализация процесса сегментации на основе применения принципов компьютерной топологии показала высокую гибкость благодаря сохранению истории изменения сегментов.

Ключевые слова: дефектоскопия; персистентные гомологии; сегментация; компьютерная топология.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Еремеев С. В., Романов С. А. Алгоритм сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска дефектов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 144-158. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-144-158>.

Поступила в редакцию 23.12.2019

Подписана в печать 30.01.2020

Опубликована 21.02.2020

An Algorithm of Image Segmentation Based on Persistent Homology for Solving Defects Searching Problems

Sergey V. Ereemeev¹ ✉, Semyon A. Romanov²

¹ Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs
23 Orlovskaya str., Murom 602264, Russian Federation

² SimbirSoft LLC
1 Narimanova av., Ulyanovsk 432001, Russian Federation

✉ e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop an image segmentation algorithm based on the persistent homology for solving problems of searching and classifying defects. The algorithm is aimed at improving the quality of products at enterprises with continuous production (metallurgy, woodworking, and others).

Methods. To segment an image, it is proposed to specify links between pixels in the image. In the future, during the iterative breaking of links, as their weights increase, pixels will be combined into groups called holes. Pixels that are in a single group have both their original characteristics and characteristics common for the entire group, and they also change the weights of their links with representatives of other groups. This creates a history of the formation of separate groups of pixels which can be specified as segments with a time-based characteristic of the change.

Results. The result of the research is the development of an algorithm designed to search for and classify defects in various materials. The optimal algorithm for applying the principle of persistent homology to images has been developed, and factors determining the transition boundaries of image objects have been analyzed and selected. The segmentation algorithm was tested on metal images obtained from sheet rolling equipment. The results of comparing the proposed algorithm with the K-means and Mean-Shift segmentation algorithms for different parameters are provided in the article.

Conclusion. Using persistent homology in image segmentation tasks can enable creating a tool that can be applied to materials with different structures without any need for significant changes. The software implementation of the segmentation process based on the principles of computer topology has shown high flexibility due to the storing of the history of segment changes.

Keywords: defect detection; persistent homology; segmentation; computer topology.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ereemeev S. V., Romanov S. A. An Algorithm of Image Segmentation Based on Persistent Homology for Solving Defects Searching Problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 144-158 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-144-158>.

Received 23.12.2019

Accepted 30.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Развитие промышленного сектора неизменно накладывает все более высокие требования к производству исход-

ных материалов. Это связано со сложностью производства конечной продукции и затратами на ее изготовление. С ростом этих показателей возрастает цена ошибки, допущенной в процессе

контроля качества исходных материалов. Качественный контроль может практически полностью исключить потери при изготовлении конечного продукта за счет отбраковки материала [1, 2].

На сегодняшний день основным методом контроля качества является человек. Несомненно, обученный специалист является наиболее точным методом определения качества. Но на линии производства, где изделия поступают непрерывно, очень большую роль играет человеческий фактор. Одним из таких факторов является «замыливание», т.е. эффект, при котором человек на протяжении долгого времени совершает одни и те же действия, вследствие чего перестаёт обращать внимание на мелкие детали, выпадающие из постоянного фокуса его внимания, и не замечает их изменений. Кроме того, есть и другие факторы, такие как эмоциональное состояние и состояние здоровья.

Одним из способов решения проблемы является введение автоматизированных систем контроля качества [3-5]. Такие системы дополняют ручную систему контроля качества, подсказывают специалисту, на что стоит обратить внимание. Например, сегментация изображения упрощает структуру материала, тем самым, снижая нагрузку на специалиста и повышая его производительность. Кроме того, сегментация позволяет привлекать специалиста только при необходимости, а именно, когда в поле зрения оказывается сегмент, напоминающий один из типов дефектов. Та-

ким образом, не только снижается нагрузка на специалиста и повышается его точность, но и увеличивается производительность систем контроля качества, понижается себестоимость продукции. Однако универсального метода для решения задачи сегментации не существует. Можно использовать производные функции, бинаризацию, фильтры Собеля и Превитта или использовать RGB составляющую. Но все эти методы имеют различные параметры в зависимости от области и условий применения, что делает затруднительным их использование в условиях постоянной изменчивости среды, например, изменение освещения и типа анализируемого материала [6-8].

Для решения задачи сегментации можно использовать топологические параметры, а именно персистентные гомологии, что позволит воссоздать дерево истории изменения сегментов, содержащего в себе информацию о полном диапазоне изменения порога яркостей [9-17].

Материалы и методы

Персистентная гомология подразумевает наличие дыр – групп пикселей, объединённых по цветовым характеристикам. Для объединения пикселей в группы необходимо представить изображение в виде списка объектов $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, где n – результат произведения размеров изображения. Каждый элемент списка $p_i = (c, x, y, h)$, где $i = \overline{1, n}$, содержит информацию о

положении пикселя, его яркости и то, к какой дыре он принадлежит. При этом $c = (r, g, b)$ – значение яркостей цветовых каналов пикселя, x – координата по оси X , y – координата по оси Y , h – дыра, которой принадлежит пиксель. Далее, необходимо установить список связей $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_m\}$, где m – общее количество связей. Каждый элемент списка $r_j = (p_1, p_2, l)$, где p_1, p_2 – информация о том, к каким точкам относится связь, i – величина расстояния между ними. Расстояние между точками измеряется по формуле (1) и напрямую зависит от величины яркости цветовых каналов выбранных точек. Согласно формуле (1) для определения расстояния между точками необходимо получить разность значения яркости каждого цветового канала пикселя, а затем посчитать среднеарифметическое значение разности всех каналов. После чего необходимо прибавить к значению разности каждого канала его отклонения от среднеарифметического значения разности:

$$l = \text{avg}(|c_1 - c_2| + ||c_1 - c_2| - \text{avg}(|c_1 - c_2|)|). \quad (1)$$

Функция avg обозначает вычисление среднеарифметического значения.

Такой подход позволит выделить зоны, цветовые каналы которых меняются с разной интенсивностью. При построении связей следует учитывать, что соединяются лишь соседние точки в плоскости OX и OY , соседние точки по диагонали не связываются между со-

бой. Таким образом, можно утверждать, что каждая точка, в зависимости от ее расположения, будет иметь до четырех связей.

Установив все связи между точками, необходимо отсортировать массив связей в порядке возрастания значения их длины l . Прделав подобные операции, мы получим некоторую схему связей (рис.1а). На рисунке представлена схема связей укрупненных пикселей, где белым цветом указаны связи между пикселями, а жирной белой линией выделена связь с наиболее низким значением длины l .

Дальнейший процесс подразумевает проход по списку связей и объединение пикселей в некоторые группы, называемые дырами h . Таким образом, обработав первую связь в списке, мы объединим p_1 и p_2 в дыру h , которой будет присвоено имя в соответствии с порядковым номером ее возникновения. На рис. 1б пиксели были объединены в дыру с именем 0. При этом вычисляется новое значение цвета для дыры, которое наследуется принадлежащим этой дыре точкам. Новое цветовое значение вычисляется по формуле $c = (c_1 + c_2) / 2$.

По мере обработки списка связей будут образовываться новые дыры. В случаях обработки связи между точкой и дырой точка поглощается дырой и приобретает цвет дыры, цвет дыры при этом не изменяется (рис. 2).

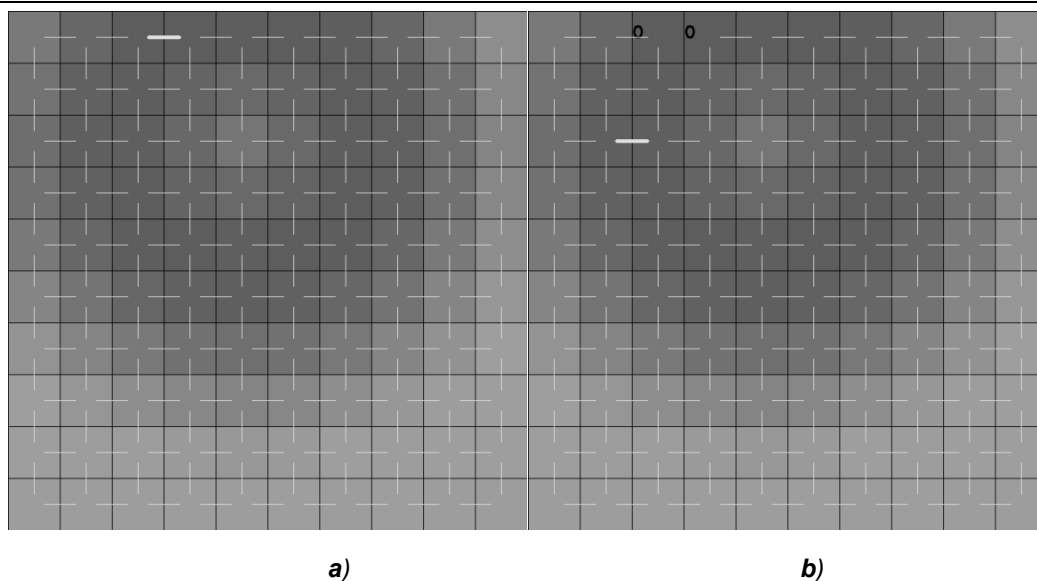


Рис. 1. Образование новой дыры: **a** – схема связей; **b** – новая дыра

Fig. 1. New hole formation: **a** – links scheme; **b** – new hole

При достаточном заполнении дырами возникают случаи, когда связь соединяет две точки, принадлежащие разным дырам (рис.3). В таком случае происходит перерасчет длины связи между этими объектами по формуле (1), после чего связь перемещается по списку свя-

зей в соответствии со своей новой длиной l .

В случае, если длина связи между дырами не может быть перемещена на новую позицию списка в соответствии с правилами сортировки, то происходит объединение двух дыр (рис.4).

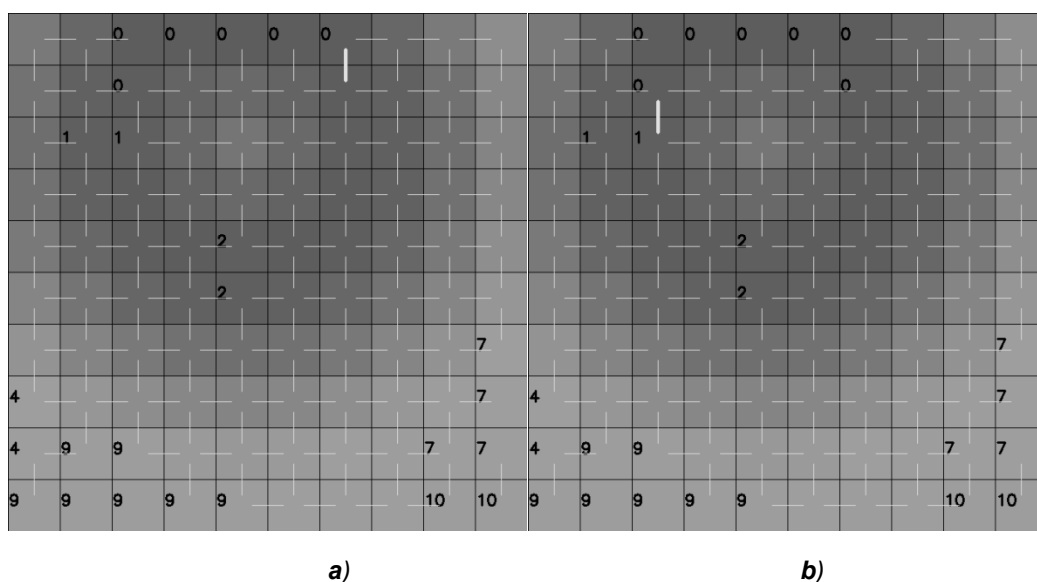


Рис. 2. Поглощение точки дырой: **a** – состояние перед поглощением; **b** – состояние после поглощения

Fig. 2. Point capture by hole: **a** – pre-capture state; **b** – post-capture state

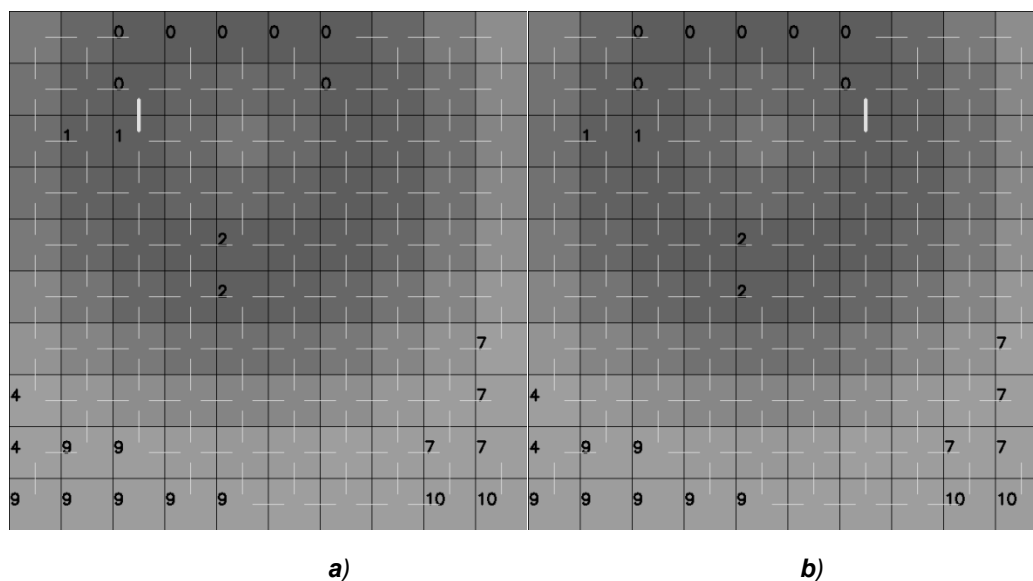


Рис. 3. Перерасчет связи между дырами: **a** – состояние перед переносом связи; **b** – состояние после переноса связи

Fig. 3. Recalculating the connection between holes: **a** – pre-connection state; **b** – post-connection state

При этом образуется новая дыра с присвоенным ей порядковым номером. В таком случае новый цвет дыры будет переопределен по формуле:

$$c = c_1 * d_1 + c_2 * d_2,$$

где d_1 – отношение общего количества точек двух дыр к количеству точек пер-

вой дыры; d_2 – отношение общего количества точек двух дыр к количеству точек второй дыры.

В процессе объединения обе дыры получают указатель на имя дыры, в которую они были объединены.

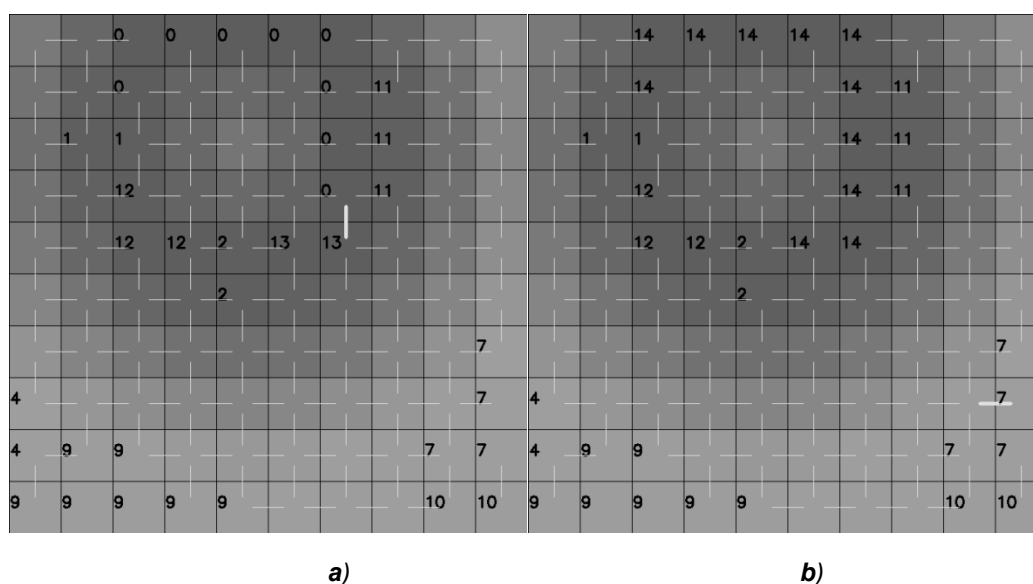


Рис. 4. Объединение двух дыр: **a** – состояние перед объединением; **b** – состояние после объединения

Fig. 4. Combining two holes: **a** – pre-combination state; **b** – post-combination state

В процессе обработки возникают случаи, когда между дырами возникает более одной связи (рис.5). Рассмотрим связи между дырами 29 и 30 (рис.5). В представленном случае будет переопределена и перенесена лишь первая связь между дырами. Остальные связи будут игнорироваться и считаться обработанными.

Кроме того, возникают случаи, когда в результате объединения двух дыр

сохраняются связи, соединяющие точки, принадлежащие одной и той же дыре. Такие связи считаются повторяющимися, они не подвергаются дальнейшей обработке и считаются обработанными (рис.6).

Процесс объединения будет продолжаться до тех пор, пока все точки не будут принадлежать одной дыре (рис.7).

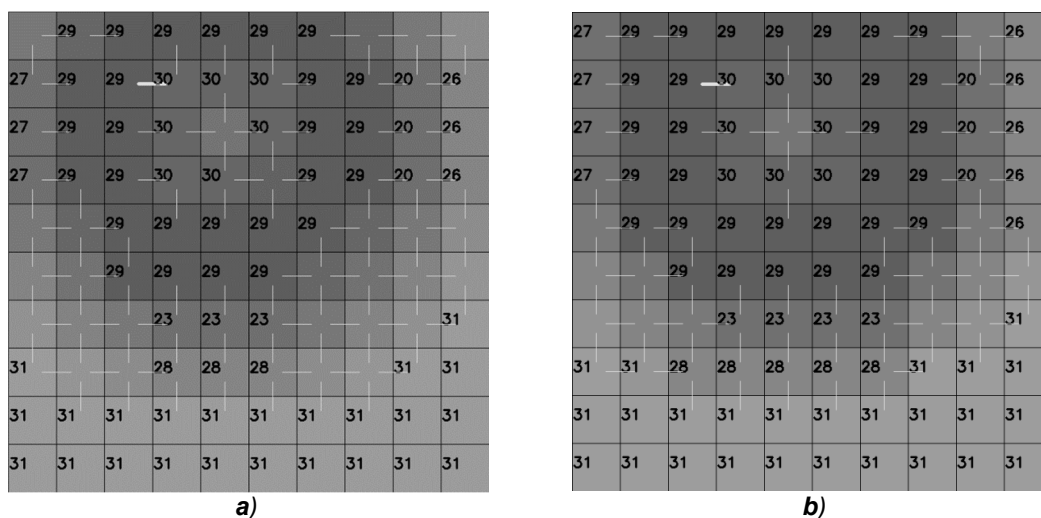


Рис. 5. Игнорирование ранее рассчитанных связей: **a** – состояние перед пропуском одинаковых связей; **b** – состояние после пропуска одинаковых связей

Fig. 5. Ignoring previously calculated links: **a** – state before skipping identical links; **b** – state after skipping identical links

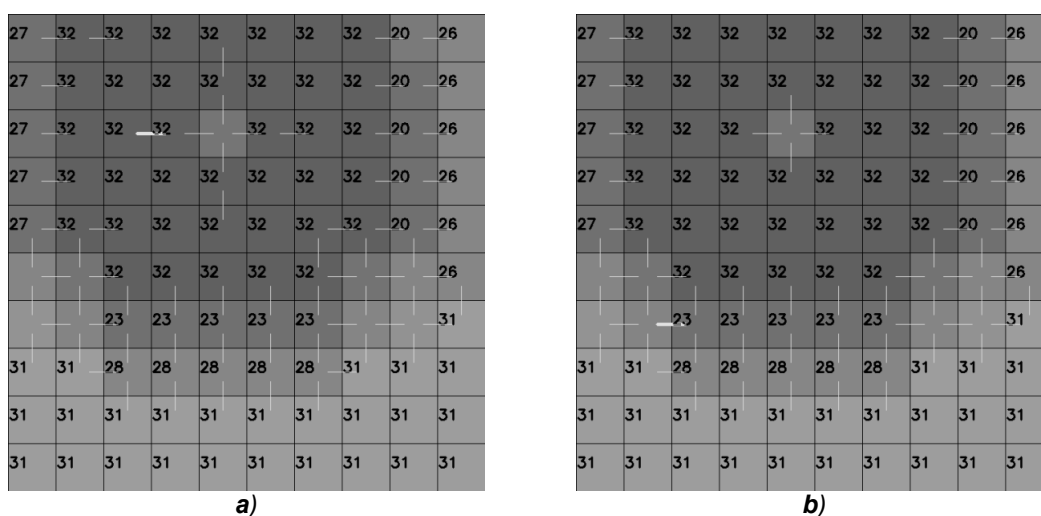


Рис. 6. Удаление связей – рудиментов: **a** – состояние перед удалением рудиментов; **b** – состояние после удаления рудиментов

Fig. 6. Removal of links - rudiments: **a** – state before removing links - rudiments; **b** – state after removing links - rudiments

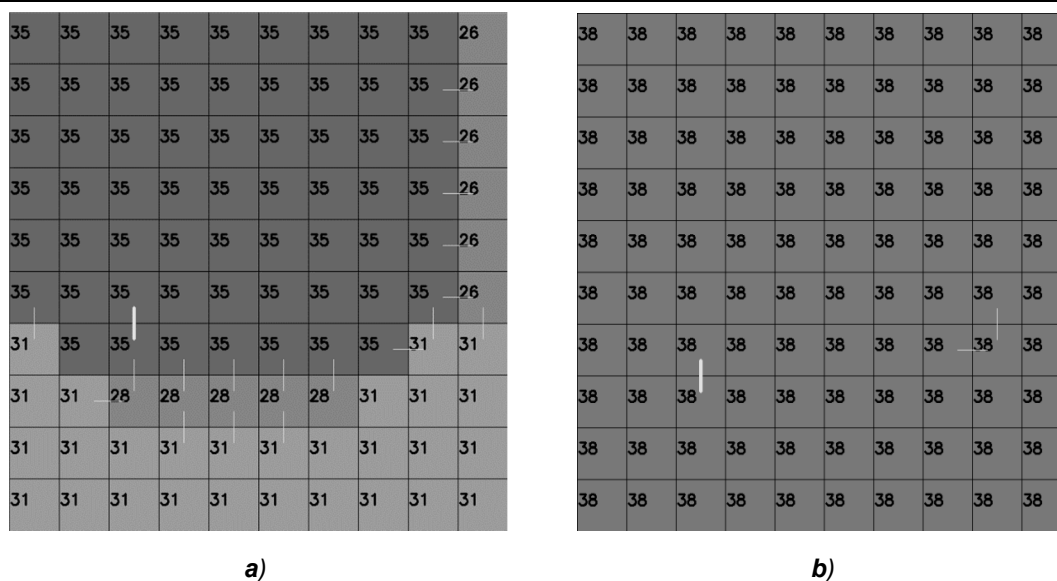


Рис. 7. Слияние в единый объект: **a** – один из финальных этапов объединения; **b** – заключительный этап объединения

Fig. 7. Merge into a single object: **a** – one of the final stages of the merger; **b** – final stage of the merger

Результаты и их обсуждение

Для реализации предлагаемого алгоритма было разработано приложение на языке C#. Применение разработанного алгоритма позволит сегментировать изображения с дефектами, сохраняя при этом всю историю преобразований. Таким образом, можно утверждать, что результатом работы является сегментация, содержащая в себе все возможные вариации при изменении порогового значения яркости. В процессе разработки программного обеспечения предусмотрена возможность визуализации с выбором текущей итерации, которая эквивалентна значению порога яркости. Также предусмотрено выделение области дыры в текущей итерации (рис.8).

Технически сегментирование реализовано при помощи установки пикселю принадлежности к той или иной дыре для различных интервалов яркости. Проведенные эксперименты показали, что соотношения размеров дыр и их цветовых значений могут выступать в качестве признака обнаружения и классификации дефекта. Выбранные параметры будут значительно отличаться от типа дефекта и анализируемого материала.

Для экспериментов использовались изображения листов металла с дефектами и без (рис.9).

На рис. 10 представлены сегментированные варианты изображений рис. 9 при пороговом значении яркости со значением 31.

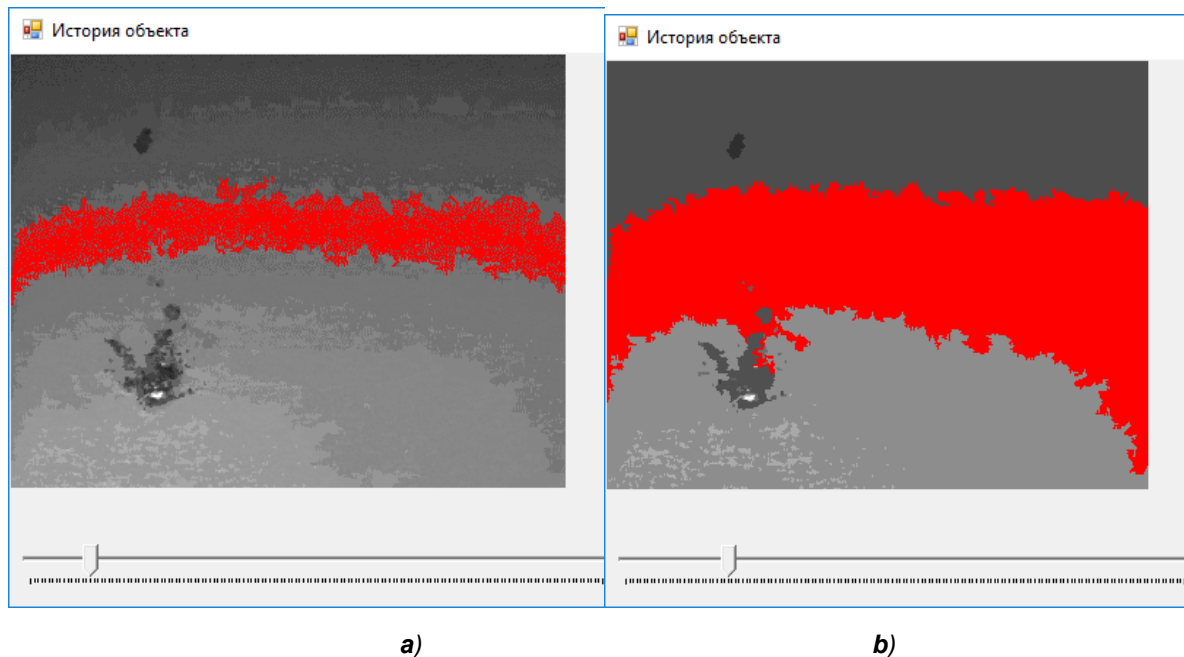


Рис. 8. Окно выделения области дыры: **a** – значение порога яркости 16; **b** – значение порога 28

Fig. 8. Window for hole area selection: **a** – brightness threshold value is 16; **b** – threshold value is 28

Для поиска порога, при котором предполагается возникновение дефекта, можно выделить числовую характеристику, которая будет показывать, какое количество дыр определенной площади присутствует на изображении для раз-

личных пороговых значений, примененных к рис. 9а (табл.1). В табл. 1 отчетливо наблюдается, что с увеличением значения порога уменьшается общее количество дыр, но увеличивается площадь оставшихся.

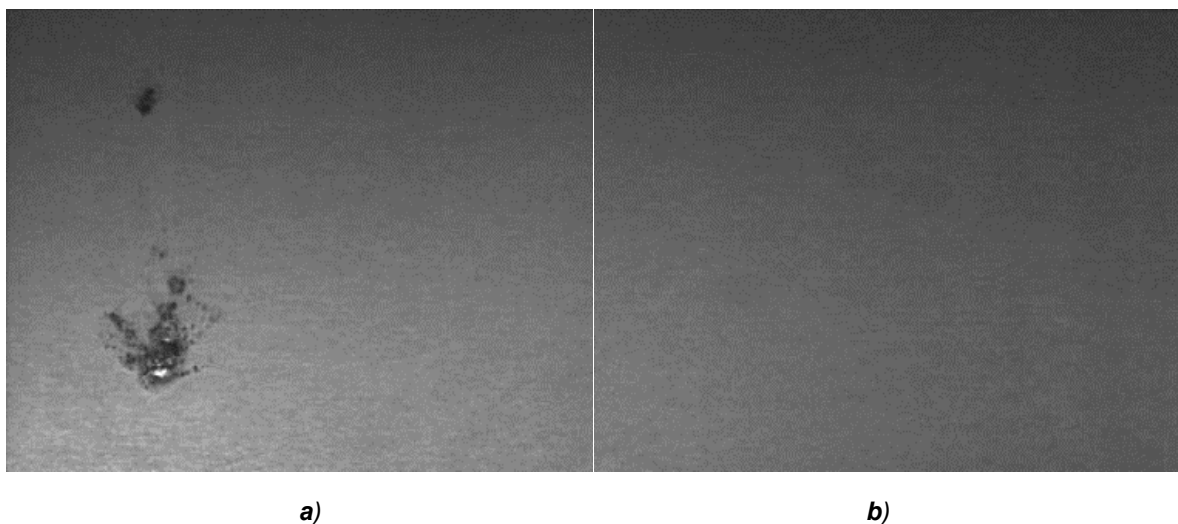


Рис. 9. Изображение металла: **a** – с дефектом; **b** – без дефекта

Fig. 9. Metal Image: **a** – defected; **b** – free from defects

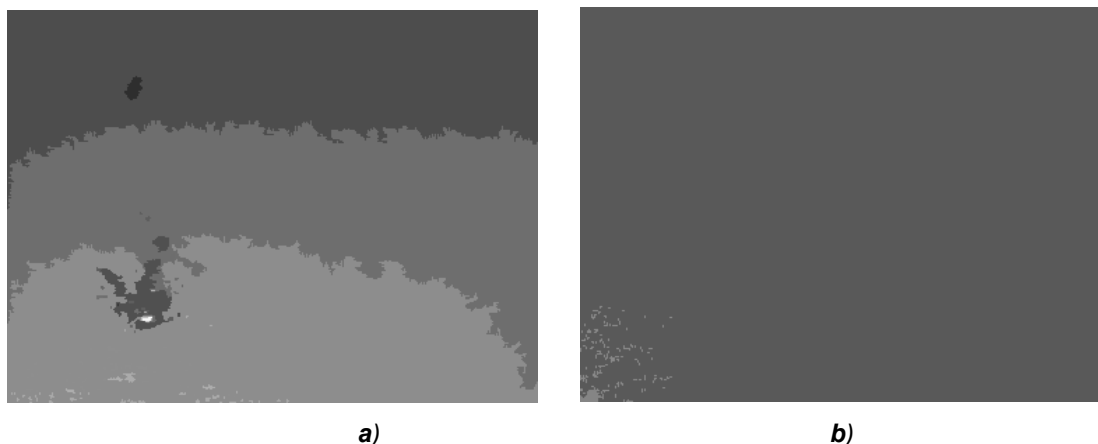


Рис. 10. Сегментированные изображения металла: **a** – с дефектом; **b** – без дефекта

Fig. 10. Segmented metal images: **a** – defected; **b** – free from defects

Таблица 1. Количество дыр в диапазонах отношения площадей для указанного порогового значения

Table 1. Number of holes in the area ratio ranges for the specified threshold value

Порог	Количество дыр при процентном соотношении площади дыры к общей площади					
	0-0,05	0,05-1	1-20	20-30	30-50	50-100
16	3802	33	7	0	0	0
20	425	13	0	2	1	0
28	204	8	0	2	1	0
31	46	3	0	2	1	0
48	15	2	0	1	0	1
153	0	0	0	0	0	1

Сравнительный анализ с другими методами сегментации показал, что для выделения конкретного дефекта требуется тонкая настройка [18-20]. Так же следует учитывать, что даже при настройке на конкретный дефект участок дефекта не является единым сегментом, а все еще разделен на несколько кластеров. В случае с сегментацией методом k-means следует выбрать необходимое число кластеров для того, чтобы четко выделить все дефекты изображения (рис.11, a-b). В результате для обнаружения всех дефектов на рис. 9,а необходимо как минимум два прохода алгоритма.

В отличие от k-means в алгоритме сегментации Mean-Shift не нужно указывать количество кластеров, но необходимо указывать пространственный радиус маски, радиус цветовой маски и максимальный уровень пирамиды сегментации. Это также осложняет процесс настройки под конкретный материал или дефект (рис.11, c-d). Кроме того, участки дефектов не образуют единого сегмента, а скорее разбивают его на несколько частей. Однако следует заметить, что применение Mean-Shift в качестве фильтра изображения перед применением алгоритма, предложенного в статье, позволяет увеличить производительность на 40% (рис.11, e-f).

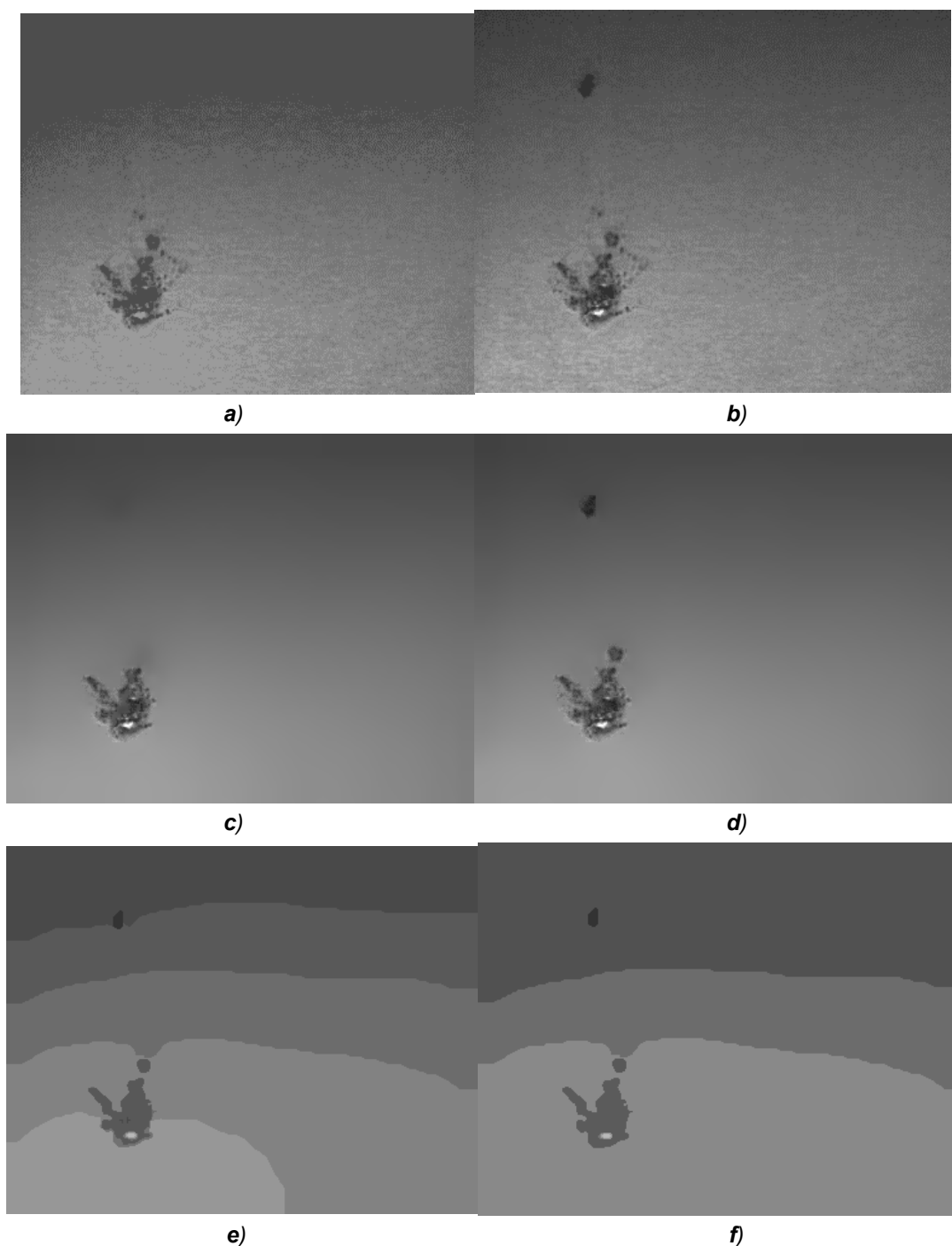


Рис. 11. Сегментация изображения различными алгоритмами: **a** – k-means при 5 кластерах; **b** – k-means при 9 кластерах; **c** – Mean-Shift, где пространственный радиус маски равен 20, радиус цветовой маски равен 25, максимальный уровень пирамиды сегментации равен 3; **d** – Mean-Shift с аналогичными параметрами, которые равны 15, 20 и 3 соответственно; **e** – Mean-Shift и основной алгоритм на 14-ой итерации; **f** – Mean-Shift и основной алгоритм на 26-ой итерации

Fig. 11. Segmentation of the image by means of different algorithms: **a** – k-means for 5 clusters; **b** – k-means for 9 clusters; **c** – Mean-Shift where the spatial mask radius is 20, the color mask radius is 25, the maximum level of the segmentation pyramid is 3; **d** – Mean-Shift with similar parameters that are equal to 15, 20 and 3 respectively (**d**); **e** – Mean-Shift and basic algorithm at 14th iteration; **f** – Mean-Shift and basic algorithm at 26th iteration

Выводы

Разработан алгоритм сегментации изображений различных материалов, основанный на методах персистентной гомологии. Разработанная модель устанавливает каждому пикселю принадлежность к некоторой группе, называемой дырой. В свою очередь, дыры содержат информацию об интервале значений яркости, для которого дыра считается активной. Выход за границы данного интервала указывает на то, что для данного значения яркости активной является одна из родительских дыр, чей

интервал жизни включает в себя текущее значение яркости. Данная методология позволяет анализировать изображение, основываясь на информации всего объединения пикселей для всех пороговых значений яркости. Подобный подход позволит анализировать различные материалы без необходимости перезапуска алгоритма с новым пороговым значением яркости. Это позволит применять данный алгоритм в условиях производства с непостоянными значениями окружения, таких как освещение, тип материала и тип дефекта.

Список литературы

1. Илющенко А. В. Анализ методов обработки изображений пиломатериалов, имеющих пороки и дефекты // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 218. С. 153–163.
2. Цапаев А. П., Кретинин О. В. Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности // Компьютерная оптика. 2012. № 36(3). С. 448–452.
3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39. P. 2481–2495.
4. Learning Video Object Segmentation from Static Images / F. Perazzi, A. Khoreva, R. Benenson, B. Schiele, A. Sorkine-Hornung // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 2663–2672.
5. Panoptic Segmentation / A. Kirillov, K. He, R. Girshick, C. Rother, P. Dollar // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 9404–9413.
6. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation / Y. Feng, H. Zhao, X. Li, X. Zhang, H. Li // Digital Signal Processing. 2017. Vol. 60. P. 186–199.
7. Head and neck target delineation using a novel PET automatic segmentation algorithm / B. Berthon, M. Evans, C. Marshall, N. Palaniappan, N. Cole, V. Jayaprakasam, T. Rackley, E. Spezi // Radiotherapy and Oncology. 2017. Vol. 122. P. 242–247.
8. Real-Time Superpixel Segmentation by DBSCAN Clustering Algorithm / J. Shen, X. Hao, Z. Liang, Y. Liu, W. Wang, L. Shao // IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 25. P. 5933–5942.

9. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Титов В.С. Алгоритм совмещения пространственных объектов разномасштабных карт на основе топологического анализа данных // Компьютерная оптика. 2019. № 43(6). С. 1021–1029.
10. Андрианов Д. Е., Еремеев С. В., Купцов К. В. Алгоритм семантической классификации пространственных объектов и сцен с использованием топологических признаков и классификатора random forest на многомасштабных картах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 4. С. 8–18.
11. Eremeev S., Seltsova E. Algorithms for Topological Analysis of Spatial Data // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 902. P. 81 – 92.
12. Еремеев С.В., Сельцова Е.А. Алгоритм топологического анализа пространственных структур в геоинформационных системах // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2017. № 1. С. 16–27.
13. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology. An introduction. AMS, Providence. 2010.
14. Kurlin V. A fast persistence-based segmentation of noisy 2d clouds with provable guarantees // Pattern Recognition Letters. 2016. Vol. 83. P. 3–12.
15. Распознавание текстур на цифровых изображениях методами вычислительной топологии / Н.Г. Макаренко, Ф.А. Уртъев, И.С. Князева, Д.Б. Малкова, И.Т. Пак, Л.М. Каримова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. № 12(1). С. 131–144.
16. Eremeev S., Kuptsov K., Romanov S. An approach to establishing the correspondence of spatial objects on heterogeneous maps based on methods of computational topology // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 10716. P. 172–182.
17. Алгоритм идентификации пространственных объектов растровой карты на основе топологического анализа данных / С.В. Еремеев, Д.Е. Андрианов, К.В. Купцов, Ю.А. Ковалев // Телекоммуникации. 2017. № 7. С. 39–44.
18. Room segmentation: Survey, implementation, and analysis / R. Bormann, F. Jordan, W. Li, J. Hampp, M Hägele // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016. P. 1018–1026.
19. El-Khatib S., Skobtsov Y., Rodzin S. Theoretical and Experimental Evaluation of Hybrid ACO-k-means Image Segmentation Algorithm for MRI Images Using Drift-analysis // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 324–332.
20. Kavzoglu T., Tonbul H. A comparative study of segmentation quality for multi-resolution segmentation and watershed transform // 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. P. 113–117.

References

1. Ilyushchenko A. V. Analiz metodov obrabotki izobrazhenij pilomaterialov, imeyushchih poroki i defekty [Analysis of methods for processing images of lumber with flaws and

defects]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = Izvestia of the St. Petersburg Academy of Forestry Engineering*, 2017, no. 218, pp. 153–163 (in Russ.).

2. Capaev A. P., Kretinin O. V. Metody segmentacii izobrazhenij v zadachah obnaruzheniya defektov poverhnosti [Image segmentation methods in problems of surface defect detection]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 448–452 (in Russ.).

3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39, pp. 2481–2495.

4. Perazzi F., Khoreva A., Benenson R., Schiele B., Sorkine-Hornung A. Learning Video Object Segmentation from Static Images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2663–2672.

5. Kirillov A., He K., Girshick R., Rother C., Dollar P. Panoptic Segmentation. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 9404–9413.

6. Feng Y., Zhao H., Li X., Zhang X., Li H. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation. *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 60, pp. 186–199.

7. Berthon B., Evans M., Marshall C., Palaniappan N., Cole N., Jayaprakasam V., Rackley T., Spezi E. Head and neck target delineation using a novel PET automatic segmentation algorithm. *Radiotherapy and Oncology*, 2017, vol. 122, pp. 242–247.

8. Shen J., Hao X., Liang Z., Liu Y., Wang W., Shao L. Real-Time Superpixel Segmentation by DBSCAN Clustering Algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, vol. 25, pp. 5933–5942.

9. Eremeev S.V., Andrianov D.E., Titov V.S. Algoritm sovmeshcheniya prostranstvennyh ob"ektov raznomasshtabnyh kart na osnove topologicheskogo analiza dannyh [An algorithm for matching spatial objects of different-scale maps based on topological data analysis]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 1021–1029 (in Russ.).

10. Andrianov D. E., Eremeev S. V., Kuptsov K. V. Algoritm semanticheskoy klassifikacii prostranstvennyh ob"ektov i scen s ispol'zovaniem topologicheskikh priznakov i klassifikatora random forest na mnogomasshtabnyh kartah [Algorithm of semantic classification of spatial objects and scenes using topological features and random forest classifier on multiscale maps]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Sea Journal: Management and High Technology*, 2018, no. 4, pp. 8–18 (in Russ.).

11. Eremeev S., Seltsova E. Algorithms for Topological Analysis of Spatial Data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 902, pp. 81–92.

12. Eremeev S.V., Seltsova E.A. Algoritm topologicheskogo analiza prostranstvennyh struktur v geoinformacionnyh sistemah [Algorithm of topological analysis of spatial structures in geographic information systems]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannyh = Algorithms, methods, and data processing systems*, 2017, no. 1, pp. 16–27 (in Russ.).

13. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology. An introduction. AMS, Providence, 2010.
14. Kurlin V. A fast persistence-based segmentation of noisy 2d clouds with provable guarantees. *Pattern Recognition Letters*, 2016, vol. 83, pp. 3–12.
15. Makarenko N.G., Urtev F.A., Knyazeva I.S., Malkova D.B., Pak I.T., Karimova L.M. Raspoznavanie tekstur na cifrovyyh izobrazheniyah metodami vychislitel'noj topologii [Recognition of textures in digital images using computational topology methods]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 131–144 (in Russ.).
16. Ereemeev S., Kuptsov K., Romanov S. An approach to establishing the correspondence of spatial objects on heterogeneous maps based on methods of computational topology. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 10716, pp. 172–182.
17. Ereemeev S.V., Andrianov D.E., Kuptsov K.V., Kovalev Y.A. Algoritm identifikatsii prostranstvennykh ob"ektov rastrovoj karty na osnove topologicheskogo analiza dannykh [Algorithm for identification of spatial objects in a raster map based on topological data analysis]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2017, no. 7, pp. 39–44 (in Russ.).
18. Bormann R., Jordan F., Li W., Hampp J., Hägele M. Room segmentation: Survey, implementation, and analysis. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 1018–1026.
19. El-Khatib S., Skobtsov Y., Rodzin S. Theoretical and Experimental Evaluation of Hybrid ACO-k-means Image Segmentation Algorithm for MRI Images Using Drift-analysis. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 324–332.
20. Kavzoglu T., Tonbul H. A comparative study of segmentation quality for multi-resolution segmentation and watershed transform. *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 2017, pp. 113–117.

Информация об авторах / Information about the Authors

Еремеев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром, Российская Федерация, e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Sergey V. Ereemeev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Information Systems, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Романов Семен Алексеевич, магистр информационных систем, старший разработчик, ООО «СимбирСофт», г. Ульяновск, Российская Федерация, e-mail: cwwc@bk.ru

Semyon A. Romanov, Master of Information Systems, Senior Developer, SimbirSoft LLC, Ulyanovsk, Russian Federation, e-mail: cwwc@bk.ru