

УДК 621.391

ВОЛНОВОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.Т. НГУЕН, Т.Х. ДОАН, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 10 ноября 2019*

Аннотация. Предложен алгоритм сегментации полутоновых изображений на основе квазипараллельного волнового выращивания областей локальных экстремумов с постепенным изменением порога яркости от значения экстремума. В отличие от известных алгоритмов сегментации предложенный алгоритм позволяет разделять области с плавными перепадами яркости, адаптироваться к ограниченному времени сегментации и контролировать число сегментов, достаточное для аппроксимации изображений и компактного описания их сегментов.

Ключевые слова: локальный экстремум, сегментация, волновое выращивание областей.

Введение

Сегментация является одной из базовых процедур цифровой обработки изображений, лежащих в основе их анализа, визуализации и объектно-ориентированного кодирования [1]. Сегментация используется для обнаружения местоположения объектов и границ в задачах визуализации медицинских изображений, поиска, классификации, распознавания и сопровождении объектов на изображениях. Сегментация обеспечивает присвоение номера каждому пикселю таким образом, что пиксели с одинаковыми номерами имеют общие визуальные характеристики. Это приводит к разделению изображения на области, которые соответствуют различным объектам или их частям [2, 3].

Точность сегментации определяет качество результатов последующей обработки. В некоторых случаях время сегментации может быть ограничено, либо необходимо контролировать число сегментов изображения [4]. К основным характеристикам методов сегментации изображений относятся время, ошибки и компактность представления результатов сегментации.

Время сегментации является основным фактором, определяющим эффективность методов сегментации. В зависимости от размера, сложности изображения, выбранного метода сегментации и вычислительных ресурсов оно составляет от долей секунды до нескольких минут.

Ошибки сегментации проявляются в точности и стабильности локализации областей при изменении условий видеорегистрации, приводящих к изменению яркости, контрастности, смещению и повороту изображения [5]. Основной причиной ошибок методов сегментации в реальных условиях является неравномерность освещения сцены, возникающая из-за нестабильности источника света, неравномерного распределения света по поверхности объекта (особенно крупного), невозможности оптической изоляции объекта от тени других объектов [6].

Учет компактности представления результатов сегментации [7] позволяет оценивать эффективность методов в плане требований к вычислительным ресурсам.

Сегментация на основе квантования по гистограмме не обеспечивает точное разделение областей из-за присвоения одинаковых номеров сегментам с одинаковой яркостью. Кроме того, известные методы сегментации, основанные на формировании областей с использованием водораздела [8–11], квантовании по гистограмме [12], разделении и слиянии областей

с использованием квадрата-дерева [13–15], выращивании областей [16–19], не эффективны для разделения областей с плавными перепадами яркости. Все рассмотренные методы не обеспечивают адаптацию к ограничениям на время сегментации и не позволяют контролировать число сегментов. В этой связи актуальна задача разработки метода сегментации изображений, учитывающего перечисленные недостатки.

Целью работы является разработка метода сегментации изображений, позволяющего разделять области с плавными перепадами яркости, адаптироваться к ограничениям на время сегментации и контролировать число сегментов для их компактного описания в задачах аппроксимации и компрессии изображений.

Метод сегментации изображений на основе встречно-волнового выращивания областей

Предлагается алгоритм сегментации полутоновых изображений на основе встречно-волнового выращивания областей локальных экстремумов. Сущность алгоритма состоит в выделении на изображении локальных экстремумов, постепенном присоединении к ним новых элементов с учетом их местоположения вокруг экстремумов, значения порога, пошагово-изменяемого от значения экстремума в противоположном направлении во избежание блокировки процесса волнового выращивания. Процесс встречно-волнового выращивания продолжается до тех пор, пока все области не будут выделены.

Отличие предложенного алгоритма от известного алгоритма выращивания областей заключается в квазипараллельном увеличении размеров выделенных областей вокруг максимумов и минимумов, что позволяет повысить точность сегментации изображений с плавными перепадами яркости. Предложенный алгоритм отличается от алгоритма волнового выращивания областей [20, 21] и регрессивного волнового выращивания областей [22, 23] выбором начальных точек роста областей в результате поиска локальных экстремумов изображения [24, 25], и увеличением их областей за счет постепенно присоединения к ним соседних элементов с учетом значений порогов, изменяемых постепенно на интервале между смежными локальными экстремумами противоположных знаков.

Алгоритм сегментации изображений на основе встречно-волнового выращивания областей экстремумов состоит из следующих шагов.

1. Инициализация. На данном шаге осуществляется буферизация изображения $I = \|i(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ размером YX пикселей и определение значения порога $\Delta_T = [1, 255]$ и шаг изменения порога $\Delta_S = [0, 254]$, определяющих условие и скорость присоединения пикселя к выращиваемой области. Формируются матрица сегментации $SM = \|sm(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$, элементы которой являются результатом сегментного поиска или блочно-сегментного поиска локальных экстремумов изображения (положительные номера – максимумы, отрицательные номера – минимумы и нулевые номера – неэкстремальные пиксели), стеки координат экстремумов в качестве стеков начальных точек роста $SY = \|sy(k)\|_{(k=0, YX-1)}$ и $SX = \|sx(k)\|_{(k=0, YX-1)}$ ($SY = \|sy(k)\|_{(k=K, YX-1)} \leftarrow 0$, $SX = \|sx(k)\|_{(k=K, YX-1)} \leftarrow 0$) и стеки $SE = \|se(n)\|_{(n=0, N-1)}$ значений яркости экстремумов, где K – число экстремальных пикселей, N – число экстремумов изображения и $K \geq N$ [24, 25].

Инициализация счетчика сканирования текущих выращиваемых пикселей $k \leftarrow 0$.

Инициализация счетчика пошагового повышения значения порога $N_T \leftarrow 1$.

2. Начало цикла сегментации.

2.1 Начало цикла пошагового повышения значения порога яркости.

Если значение указателя счетчика N_T больше нуля ($N_T > 0$), то присваивается значение 0 счетчику N_T ($N_T \leftarrow 0$), переход на следующий шаг, иначе ($N_T = 0$) – переход на шаг 2.9.

2.2 Начало цикла сканирования текущих выращиваемых пикселей.

Если последний пиксель стека роста области не обрабатывается ($k \leq K$), то переход на следующий шаг, иначе ($k > K$) – переход на шаг 2.8.

2.3 На основе координат текущего выращиваемого пикселя (y_E, x_E) указателя k вычисляются координаты (y_N, x_N) текущего окрестного пикселя:

$$\begin{aligned} y_N &= y_E + j, \\ x_N &= x_E + i, \end{aligned} \tag{1}$$

где $(j \in \{-1, 0, 1\}) \wedge (i \in \{-1, 0, 1\}) \setminus (j = 0 \wedge i = 0)$, $y_E = sy(k)$, $x_E = sx(k)$.

Проверяется на ноль значение элемента матрицы сегментации, координаты которого соответствуют найденным координатам (y_N, x_N) окрестного пикселя. Если это значение не равно нулю ($sm(y_N, x_N) \neq 0$), то переход на следующий окрестный пиксель, иначе ($sm(y_N, x_N) = 0$) – переход на следующий шаг.

2.4 Абсолютное значение разности значений текущего выращиваемого экстремума $I_E = se(|sm(y_E, x_E)|)$ и текущего окрестного пикселя $i(y_N, x_N)$ сравниваются с заданным порогом Δ_T . Если абсолютное значение разности меньше или равно порогу ($|I_E - i(y_N, x_N)| \leq \Delta_T$ – окрестный пиксель должен быть присоединен к областям), то переход на следующий шаг, иначе ($|I_E - i(y_N, x_N)| > \Delta_T$) – переход на шаг 2.7.

2.5 Элементу матрицы сегментации, координаты которого соответствуют координатам (y_N, x_N) текущего окрестного пикселя, присваивается значение элемента матрицы сегментации, координаты которого соответствуют координатам (y_E, x_E) текущего выращиваемого пикселя $sm(y_N, x_N) \leftarrow sm(y_E, x_E)$.

2.6 Указатель текущего числа выращиваемых пикселей K стеков роста области увеличивается на единицу. В стеки роста области заносятся координаты текущего окрестного пикселя:

$$\begin{aligned} sy(K) &\leftarrow y_N, \\ sx(K) &\leftarrow x_N, \\ K &\leftarrow K + 1. \end{aligned} \tag{2}$$

2.7 Указатель N_T счетчика пошагового повышения значения порога яркости увеличивается на единицу. В стеки роста области заносятся координаты текущего окрестного пикселя:

$$\begin{aligned} N_T &\leftarrow N_T + 1, \\ sy(N_T) &\leftarrow y_N, \\ sx(N_T) &\leftarrow x_N. \end{aligned} \tag{3}$$

2.8 Проверка указателя счетчика сканирования текущих выращиваемых пикселей на суммарное число выращиваемых пикселей K . Если указатель меньше или равно K ($k \leq K$), то переход на шаг 2.2 и увеличивается указатель k на единицу ($k \leftarrow k + 1$), иначе ($k > K$) – переход на следующий шаг.

2.9 Проверка указателя счетчика пошагового повышения значения порога яркости на ноль. Если указатель больше нуля, то присваиваются единица указателю k ($k \leftarrow 1$), значение N_T указателю K ($K \leftarrow N_T$) и увеличивается порог Δ_T на шаг Δ_S ($\Delta_T \leftarrow \Delta_T + \Delta_S$), иначе ($N_T = 0$) – выход из алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма формируется матрица сегментации, значение каждого элемента которой указывает на номер сегмента, которому принадлежит пиксель сегментируемого изображения с соответствующими координатами. С каждым циклом размеры сегментов постепенно увеличиваются, в чем проявляется прогрессивный характер сегментации. Число полученных сегментов совпадает с числом локальных экстремумов

изображения, что позволяет контролировать это число, а также местоположение и размеры сегментов.

Оценка эффективности алгоритмов сегментации изображений

Для оценки эффективности методов сегментации на рис. 1 показаны четыре тестовых полутоновых изображения: Image1 и Image2 с плавно изменяемой яркостью, низкочастотное изображение Lena и высокочастотное изображение City размером 256×256 пикселей.



Рис. 1. Тестовые полутоновые изображения: *a* – Image1; *б* – Image2; *в* – Lena; *г* – City

На рис. 2–5 показаны результаты сегментации вышеуказанных полутоновых изображения с помощью предложенного метода, методов сегментации на основе выращивания областей, разделения и слияния областей, водораздела на основе градиентов.

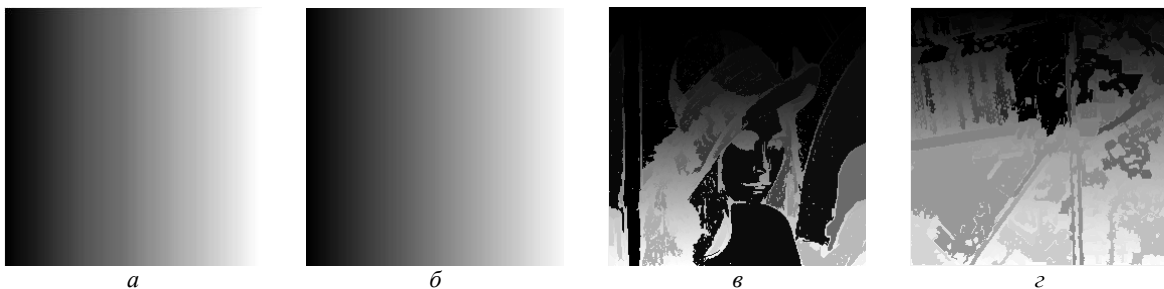


Рис. 2. Результат применения алгоритма выращивания областей: *a* – 152 сегментов ($\Delta_T = 0$);
б – 145 сегментов ($\Delta_T = 0$); *в* – 6988 сегментов ($\Delta_T = 5$); *г* – 9323 сегментов ($\Delta_T = 5$)

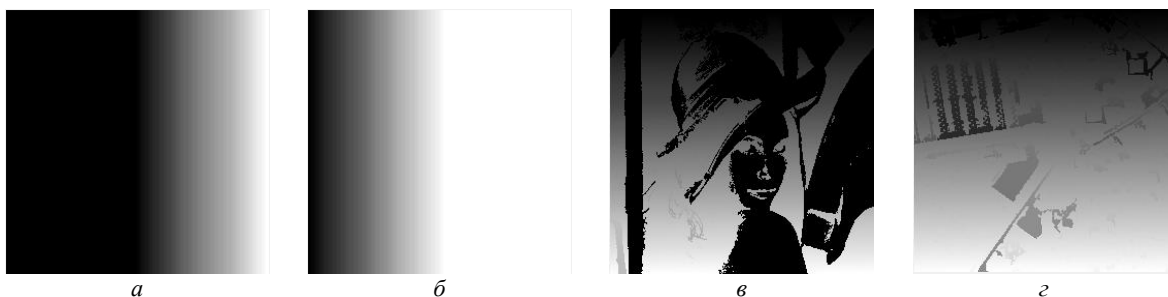


Рис. 3. Результат применения алгоритма разделения и слияния областей: *a* – 79 сегментов;
б – 77 сегментов; *в* – 25753 сегментов; *г* – 40081 сегментов

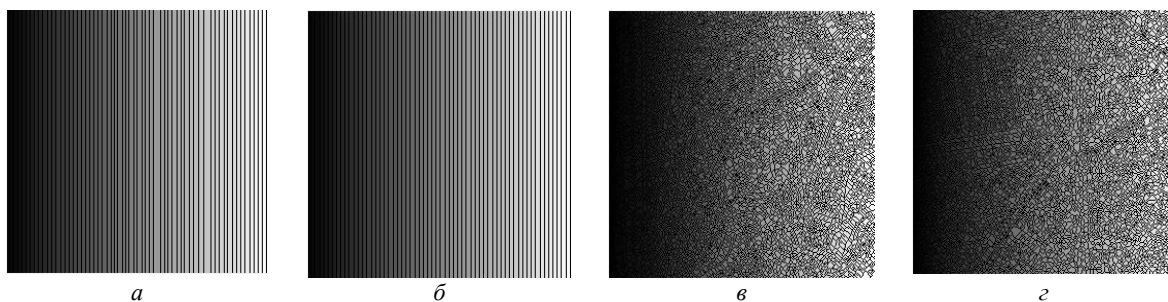


Рис. 4. Результат применения алгоритма водораздела на основе градиентов: *a* – 62 сегментов;
б – 62 сегментов; *в* – 8728 сегментов; *г* – 8003 сегментов

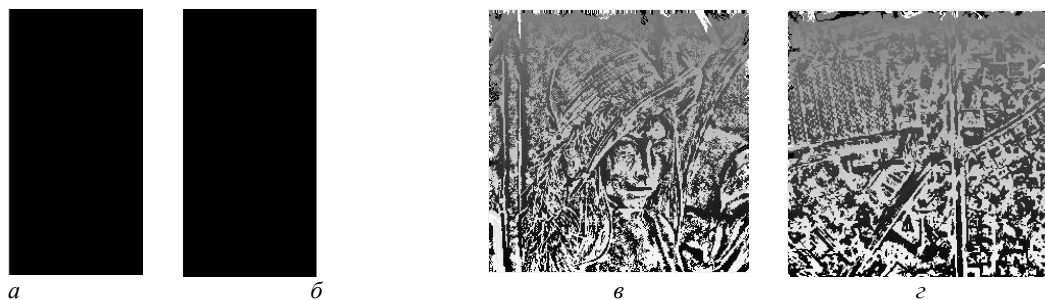


Рис. 5. Результат разработанного метода: *a* – 2 сегмента ($\Delta_T = 1, \Delta_S = 1$); *б* – 2 сегмента ($\Delta_T = 1, \Delta_S = 1$); *в* – 7507 сегментов ($\Delta_T = 1, \Delta_S = 1$); *з* – 4830 сегментов ($\Delta_T = 1, \Delta_S = 1$)

Из рис. 2–5 видно, что предложенный алгоритм обеспечивает стабильное положение границы и выделение 2-х областей при любом значении перепада яркости (рис. 5, *a, б*). Остальные алгоритмы при некоторых значениях перепада яркости показывают ошибку или избыточность сегментации, выделяя на изображении много избыточных областей. Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает повышение чувствительности сегментации к перепадам яркости, формы полученных сегментов которой не являются сложными и зависят от местоположений, форм и расстояний между экстремумами на изображении, что позволяет компактно их описать для последующей обработки. Такое компактное описание сегментов представляет интерес для распознавания и сжатия изображений.

Произведена оценка эффективности предложенного алгоритма и известных алгоритмов сегментации. В качестве показателей эффективности использованы время сегментации, стабильность границ и числа сегментов.

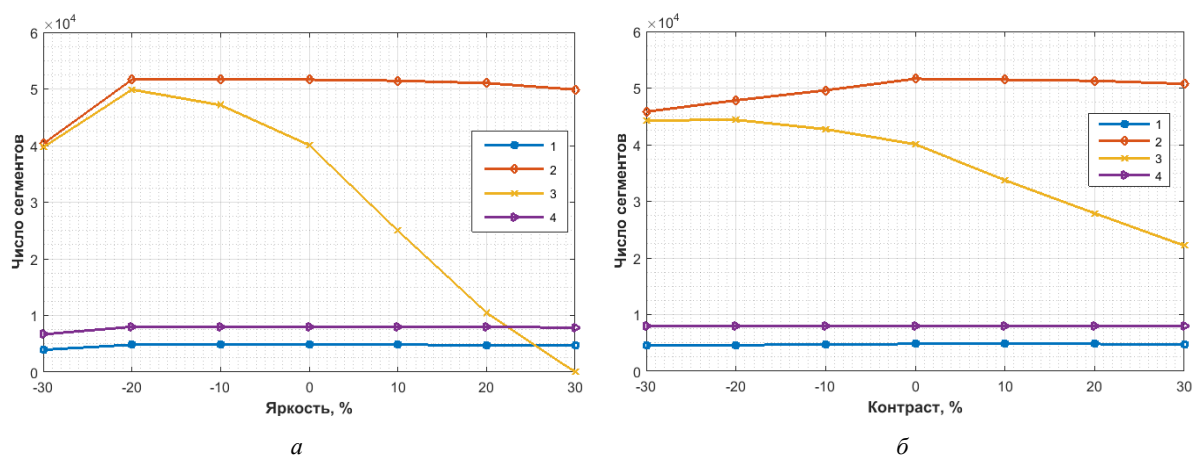


Рис. 6. Зависимости числа сегментов от изменения условий формирования изображения City (рис. 1, *з*): *a* – при изменении яркости; *б* – при изменении контраста (1 – предложенный метод; 2 – выращивания областей; 3 – разделения и слияния областей; 4 – водораздела на основе градиентов)

На рис. 6 приведены зависимости числа сегментов от изменения яркости и контраста, характеризующие устойчивость результатов сегментов. Устойчивость оценивается по отношению числа сегментов для базового изображения к числу сегментов для модифицированного изображения, подвергнутого изменению яркости и контраста. Установлено, что предложенный алгоритм выигрывает в стабильности числа сегментов при изменении яркости, контраста по сравнению с алгоритмами сегментации на основе выращивания областей, разделения и влияния областей, в уменьшении избыточности сегментов по сравнению с алгоритмом сегментации на основе водораздела.

В табл. 1 приведены результаты оценки времени сегментации для рассматриваемых алгоритмов в среде Matlab и Matlab ®Image Processing Toolbox (R2015a), в системе Intel Core i3 3,1 ГГц с 6 ГБ ОЗУ. Для этого эксперимента использованы четыре изображения размерами 128×128, 256×256, 512×512 и 1024×1024 пикселей.

Таблица 1. **Время сегментации тестовых изображений**

№	Алгоритмы сегментации	Язык программирования	Время сегментации, с			
			Lena 128×128	Barbara 256×256	France 512×512	Man 1024×1024
1	Предложенный	Matlab	0,067	0,247	0,937	3,374
2	Выращивания областей	Matlab	0,084	0,291	1,115	4,422
3	Разделения и слияния областей	C/C++	0,029	0,077	0,311	1,246
4	Водораздела на основе градиентов	C/C++	0,017	0,043	0,162	0,917

Из табл. 1 следует, что предложенный алгоритм выигрывает в скорости сегментации по сравнению с алгоритмом выращивания областей при любом размере изображений, но проигрывает в скорости сегментации по сравнению с алгоритмами разделения и слияния областей, водораздела на основе градиентов, написанными на языке программирования C/C++. Скорость обработки предложенного алгоритма улучшается в несколько раз при реализации на языке программирования C++.

Заключение

Для сегментации изображений предложен алгоритм на основе встречно-волнового выращивания областей локальных экстремумов. Сущность алгоритма заключается во встречном квазипараллельном выращивании областей вокруг локальных минимумов и максимумов, выбранных в качестве начальных точек роста. Это обеспечивает автоматическое разделение областей с плавным перепадом яркости, которые известные алгоритмы сегментируют с ошибками. Показано, что предложенный алгоритм позволяет четко выделять сегменты и контролировать их количество по сравнению с известными алгоритмами сегментации. Установлено, что предложенный алгоритм выигрывает в скорости сегментации по сравнению с алгоритмом выращивания областей при любых размерах изображений и в стабильности числа сегментов по сравнению с известными алгоритмами. Для уменьшения избыточности и повышения устойчивости сегментации к шумам в качестве предварительной обработки может быть использована низкочастотная фильтрация.

WAVE GROWING OF LOCAL EXTREME REGIONS OF IMAGES

A.T. NGUYEN, T.H. DOAN, V.Yu. TSVIATKOU

Abstract. An algorithm for the segmentation of grayscale images based on quasi-parallel wave growth of local extrema with a gradual change in the brightness threshold from the extremum value was proposed. Unlike well-known segmentation algorithms, the proposed algorithm allows to separate areas with smooth differences in brightness, adapt to a limited segmentation time and control the number of segments sufficient to approximate images and compactly describe their segments.

Keywords: local extrema, image segmentation, wave region growing, counter-wave region growing.

Список литературы

1. Milan S. [et al.] // Thomson press, west. 2008. P. 175–240.
2. Chijindu V.C., Inyama H.C., Uzedhe G. // African Journal of Computing & ICT. 2012. Vol. 5, № 5. P. 90–98.
3. Shivhare P., Gupta V. // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2015. Vol. 4. P. 153–157.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М. Техносфера. 2006.
5. Fabijańska A., Strzecha K., Sankowski D. // CADSM'2007, Polyana, Ukraine, 20–24 February, 2007. P. 439–441.
6. Chandrakala M., Devi P.D. // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE). 2016. Vol. 5. P. 163–168.
7. Гладырева А. Ю. // Автоматика, Львів, Україна, 28–30 вересня 2011. 2011. С. 348–349.
8. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2, № 2. P. 348–358.
9. Gauch J.M. // IEEE transactions on image processing. 1999. Vol. 8, № 1. P. 69–79.
10. Khoyal M.S.H., Khan A., Bibi A. // Informing Science and Information Technology. 2009. Vol. 6. P. 876–886.
11. Arindrajit Seal, Arunava Das, Prasad Sen // International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT). 2015. Vol. 6, № 3. P. 2295–2297.
12. Chang J.H., Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
13. Muhsin Z.F., [et. al.] // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62, № 1. P. 56–62.
14. Xiaolin Wu // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1993. Vol. 15, № 8. P. 808–815.
15. Dass R., Priyanka, Devi S. // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). 2012. Vol. 3, Issue 1. P. 66–70.
16. Singh K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7, № 5. P. 414–417.
17. Shih F. Y., Cheng S. // Image and Vision Computing. 2005. № 23. P. 877–886.
18. Sharma Ritu, Sharma Rajesh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2, Issue 9. P. 5686–5692.
19. Mohd Saad N., [et. al.] // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, 14–16 March 2012. P. 674–677.
20. Альмияхи О.М., Конопелько В.К. // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы международного научно-технического семинара. Минск, БГУИР. 2015. С. 61–67.
21. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. // Докл. БГУИР. 2016 № 3 (97). С. 24–30.
22. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю., Ловецкий М. Ю. // Мониторинг техногенных и природных объектов: сб. материалов междунар. научн. -техн. конф. Минск, БГУИР. 2017. С. 77–84.
23. Рабцевич В.В., Нгуен А.Т., Цветков В.Ю. // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference. Minsk, BSUIR. 2018. С. 373–377.
24. Nguyen A.T, Tsviatkou V.Yu. // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE). 2019. Vol. 8, № 9. P. 1–10.
25. Цветков В.Ю., Нгуен А.Т. // Информатика. 2019. 16 (3). С. 23–36.