

УДК 528.854.4

Сергеева Е.Л.

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ЗЕМНОГО ПОКРОВА ТЕРРИКОНОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Национальный горный университет

*Разработана информационная технология классификации типов земного покрова терриконовых ландшафтов горнопромышленных регионов по данным мультиспектральной космической съемки на основе расчета множества значений корреляционных характеристик каналов космоснимков. Выполнена проверка информационной технологии на данных космической съемки Terra-ASTER участка Донбасса*

### **Постановка проблемы**

Данные мультиспектральной космической съемки применяются для классификации типов земного покрова промышленных антропогенных ландшафтов и выделения терриконов – искусственных насыпей преимущественно конической формы, образованных из пустых пород при разработке месторождений полезных ископаемых [1-4].

Характерными особенностями терриконов является округлая либо эллипсообразная у основания форма конического отвала, повышенная приповерхностная температура и поврежденная либо отсутствующая растительность. Однако по своим спектральным характеристикам поросшие растительностью терриконы сходны с участками растительного покрова, а не поросшие растительностью – с участками городской застройки. Поэтому актуальной задачей является разработка информационной технологии, позволяющей отделять фрагменты изображений класса "Терриконы" от фрагментов прочих классов.

### **Анализ последних достижений и публикаций**

Для решения задач анализа и классификации ландшафтов по данным космической съемки используются следующие группы характеристик:

- спектральные;
- текстурные;
- морфометрические.

Спектральные характеристики предполагают расчет вегетационных индексов, позволяющих производить оценку состояния растительного покрова, отделять участки почв от участков растительности и др. [5].

Текстурные характеристики основываются на вычислении центральных моментов нормированной гистограммы яркости фрагментов изображения, инвариантов моментов и характеристик яркостных матриц смежности [6].

Морфометрические характеристики базируются на анализе формы групп пикселей фрагментов изображений различных классов. К примеру, форма терриконов близка к окружности либо эллипсу, что позволяет производить расчет коэффициентов компактности и коэффициентов подобия к окружности для идентификации терриконов на космоснимках [7].

Расчет данных групп характеристик не позволяет принять однозначное решение о принадлежности анализируемого фрагмента изображения к классу "Терриконы". Значения вегетационных индексов принадлежат к единому интервалу для участков открытого грунта и не поросших растительностью терриконов. Высокие значения приповерхностной температуры терриконов, регистрируемые сканером, не всегда свидетельствует о наличии процессов горения.

Для повышения точности классификации типов земного покрова и выделения терриконов по данным косми-

ческой съемки в работе предлагается расчет корреляционных характеристик каналов мультиспектральных изображений.

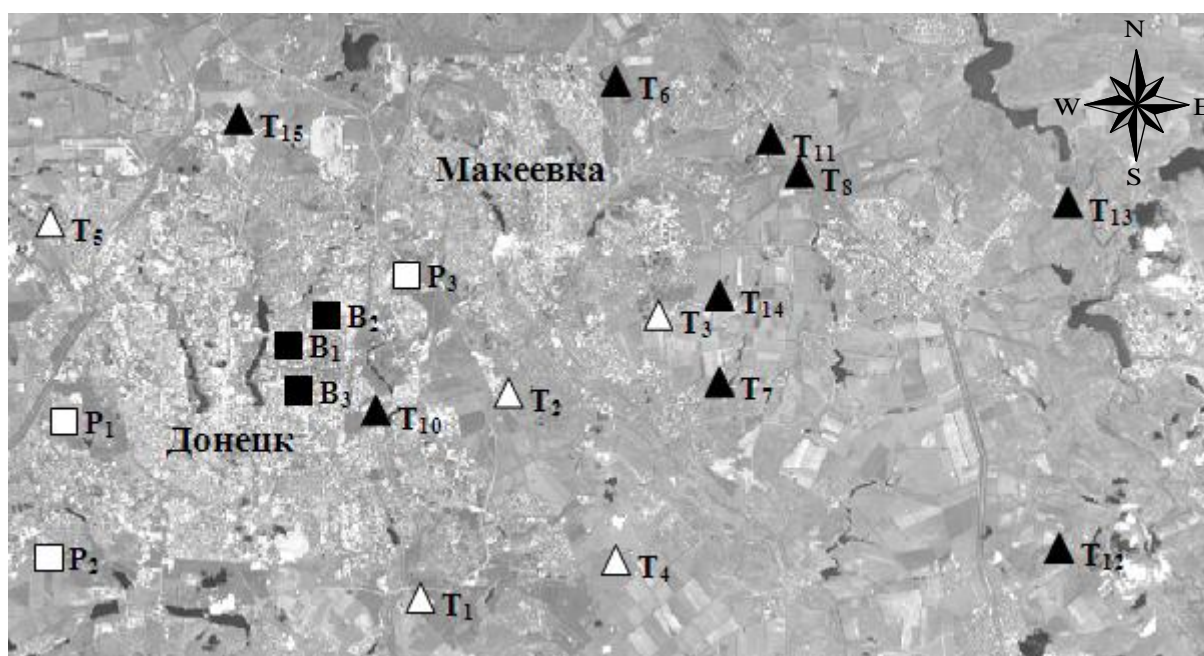
Цель работы – разработка информационной технологии классификации типов земного покрова по мультиспектральным данным космической съемки.

Исходные данные – каналы 10-14 мультиспектрального космического изображения *Terra-ASTER* (дата съемки: 29.07.2005 г.) (табл. 1) [8] городов Донецк, Макеевка и прилегающих территорий. На рис. 1 представлен фрагмент мультиспектрального изображения *Terra-ASTER* и отмечено расположение

некоторых участков классов "Терриконы", "Зеленые насаждения" и "Городская застройка". Сведения о терриконах представлены в табл. 2.

Таблица 1. Сведения о каналах сканера *Terra-ASTER*

Номер канала	Спектральный диапазон, микроны	Пространственное разрешение, м
10	8,125 – 8,475	90
11	8,475 – 8,825	
12	8,925 – 9,275	
13	10,25 – 10,95	
14	10,95 – 11,65	



- △ – горящие терриконы  
 ▲ – негорящие терриконы  
 □ – зеленые насаждения  
 ■ – городская застройка

Рис. 1. Фрагмент мультиспектрального изображения *Terra-ASTER* городов Донецк и Макеевка с отмеченным расположением исследуемых участков

### Информационная технология классификации типов земного покрова

Информационная технология классификации типов земного покрова по данным мультиспектральной космической съемки включает этапы расчета корреляционных характеристик, отбора информативных характеристик, вычисления мер сходства характеристик различных классов, классификацию и оценку точности классификации (рис. 2) [9-12].

ской съемки включает этапы расчета корреляционных характеристик, отбора информативных характеристик, вычисления мер сходства характеристик различных классов, классификацию и оценку точности классификации (рис. 2) [9-12].

Таблица 2. Сведения о терриконах

№	Наименование предприятия	Координаты центра террикона		Состояние горения	Площадь, га
		Широта	Долгота		
T <sub>1</sub>	ЦОФ "Чумаковская"	47,9356	37,8975	горящий	45

T <sub>2</sub>	ОП "Шахта Глубокая"	47,9981	37,9467	горящий	20
T <sub>3</sub>	ОП "Шахта им. В.И. Ленина"	48,0244	38,0240	горящий	63,5
T <sub>4</sub>	ОП "Шахта Наклонная"	47,9467	37,9986	горящий	4
T <sub>5</sub>	ОП "Шахта Октябрьский рудник"	48,0497	37,7153	горящий	21,5
T <sub>6</sub>	ОП "Шахта им. В.М. Бажанова"	48,0927	38,0014	негорящий	18
T <sub>7</sub>	ОП "Шахта Холодная Балка"	48,0041	38,0519	негорящий	5,5
T <sub>8</sub>	ОП "Шахта им. С.М. Кирова"	48,0642	38,0958	негорящий	11
T <sub>9</sub>	СП "Шахта им. В.И. Ленина"	48,3203	38,0081	негорящий	15
T <sub>10</sub>	ОП "Шахта Заперевальная"	47,9950	37,8773	негорящий	22
T <sub>11</sub>	ОП "Шахта 13-бис"	48,0731	38,0729	негорящий	8
T <sub>12</sub>	ОП "Шахта Иловайская"	47,9524	38,2200	негорящий	5
T <sub>13</sub>	ОП "Шахта Коммунист"	48,0565	38,2229	негорящий	3
T <sub>14</sub>	ОАО ЦОФ "Пролетарская"	48,0253	38,0467	негорящий	11
T <sub>15</sub>	АП "Шахта им. Засядько"	48,0804	37,8097	негорящий	63

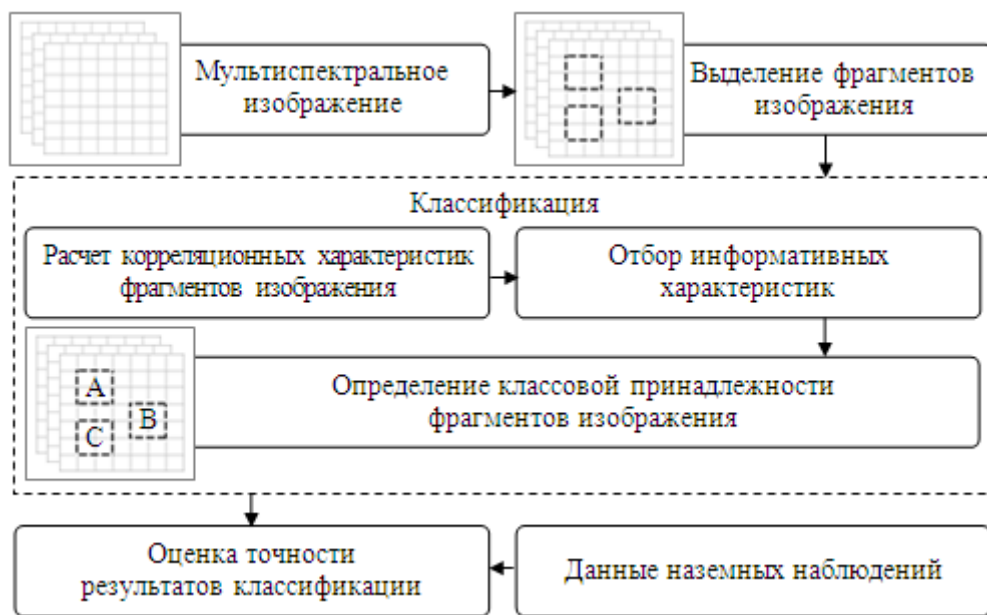


Рис. 2. Схема информационной технологии классификации терриконовых ландшафтов по данным мультиспектральной космической съемки

1. Создание множества корреляционных характеристик мультиспектральных изображений производится путем расчета коэффициентов парной корреляции между каналами изображений.

Пусть  $f_{ijk}$  – яркость растрового мультиспектрального изображения  $F$  в точке с координатами  $(i, j, k)$ ,  $(i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L$  – номер строки, столбца и канала соответственно).

Расчет коэффициентов парной корреляции между каналами мультиспектрального изображения производится в

пределах фрагмента размером  $n \times m$  ( $1 \leq n \leq N, 1 \leq m \leq M$ ) по формуле:

$$r_{k_1 k_2} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (f_{ijk_1} - \bar{f}_{k_1})(f_{ijk_2} - \bar{f}_{k_2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (f_{ijk_1} - \bar{f}_{k_1})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (f_{ijk_2} - \bar{f}_{k_2})^2}}$$

где  $\bar{f}_{k_i}$  – средняя яркость по каналу  $k_i$  изображения  $F$  в пределах  $i$ -го фрагмента размером  $n \times m$ .

2. Отбор информативных характеристик.

Критерием информативности корреляционных характеристик комбинаций каналов фрагментов мультиспектрального

изображения различных классов являются низкие значения внутрикласовой дисперсии и высокие значения межкласовой. Например, в таблице 3 серым цветом отмечены комбинации каналов, характе-

ризующиеся одновременно высокими значениями коэффициентов парной корреляции для объектов класса "Терриконы" и средними значениями для объектов класса "Городская застройка".

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции  $r_{ij}$  между  $i$ -м и  $j$ -м каналами мультиспектрального изображения

Классы	№	Комбинации каналов									
		10,11	10,12	10,13	10,14	11,12	11,13	11,14	12,13	12,14	13,14
Терриконы	$T_1$	0,87	0,98	0,86	0,86	0,89	0,99	0,99	0,88	0,88	1,00
	$T_2$	0,84	0,99	0,86	0,85	0,85	0,98	0,98	0,85	0,85	1,00
	$T_3$	0,81	0,98	0,81	0,80	0,82	0,98	0,98	0,81	0,81	0,99
Городская застройка	$B_1$	0,49	0,86	0,60	0,58	0,42	0,89	0,92	0,64	0,57	0,99
	$B_2$	0,43	0,86	0,54	0,57	0,37	0,78	0,70	0,49	0,62	0,93
	$B_3$	0,47	0,96	0,51	0,24	0,49	0,94	0,70	0,51	0,18	0,71

3. Классификация типов земного Покрова Разделение фрагментов изображения классов "Терриконы" и "Городская застройка", а также "Терриконы" и "Зеленые насаждения" производилось по минимуму спектральных расстояний между векторами корреляционных характеристик. Количество элементов вектора корреляционных характеристик

$r = \{r_{10,11}, \dots, r_{10,14}, r_{11,12}, \dots, r_{11,14}, r_{12,13}, \dots, r_{12,14}, r_{13,14}\}$  составляет:  $q = C_L^2 = \frac{L!}{2(L-2)!}$ . Для исходного пятиканального мультиспектрального изображения  $q = 10$ . Меры расстояния между векторами корреляционных характеристик  $r_1$  и  $r_2$  двух фрагментов изображения  $F_1$  и  $F_2$  различных классов рассчитываются в соответствии с приведенными ниже выражениями.

1) евклидово расстояние

$$d_1(r_1, r_2) = \sqrt{(r_1 - r_2)(r_1 - r_2)^T},$$

где  $T$  – операция транспонирования;

2) расстояние по Манхеттену

$$d_2(r_1, r_2) = |r_1 - r_2|_1$$

3) косинусное расстояние

$$d_3(r_1, r_2) = \left[ 1 - \frac{r_1^T r_2}{\sqrt{r_1^T r_1} \sqrt{r_2^T r_2}} \right]$$

4) корреляционное расстояние

$$d_4(r_1, r_2) = 1 - \frac{(r_1 - \bar{r}_1)(r_2 - \bar{r}_2)^T}{\sqrt{(r_1 - \bar{r}_1)(r_1 - \bar{r}_1)^T} \sqrt{(r_2 - \bar{r}_2)(r_2 - \bar{r}_2)^T}},$$

где  $\bar{r}_i$  – среднее значение вектора корреляционных характеристик  $i$ -го фрагмента изображения,  $i = 1, 2$ ;

5) расстояние Махаланобиса

$$d_5(r_1, r_2) = \sqrt{0,5(r_1 - r_2)(C_1 + C_2)^{-1}(r_1 - r_2)^T},$$

где  $C_1, C_2$  – ковариационные матрицы.

б) расстояние Минковского

$$d_6(r_1, r_2) = \left[ \sum_{i=1}^q |r_{1i} - r_{2i}|^p \right]^{\frac{1}{p}}, \quad p \in \mathbb{N}$$

Классификация с обучением типов земного покрова производилась с использованием метода ближайшего соседа (Nearest neighbor) и функции меры близости (ФМБ) [11] по минимуму расстояния  $d$  между классифицируемыми и эталонными фрагментами изображения. Функция меры близости между фрагментом изображения  $F_k$ ,  $k = 1, \dots, K$  (где  $K$  – количество классифицируемых фрагментов изображения) и классом  $Z_j = \{z_{j1}, \dots, z_{jn}\}$ ,  $j = 1, 2$  вычисляется следующим образом:

$$d_{\text{ФМБ}}(F_k, Z_j) = \left[ \prod_{i=1}^n d(F_k, z_{ji}) \right]^{\frac{1}{n}},$$

где  $n$  – количество эталонных фрагментов изображения  $j$ -го класса.

Решающее правило: фрагмент изображения  $F_k$  зачисляется в класс  $Z_j$ , если  $d_{\text{ФМБ}}(F_k, Z_j) < d_{\text{ФМБ}}(F_k, Z_i), i \neq j, i, j = 1, 2$ .

Автоматическая классификация (кластеризация) основывалась на методе  $k$ -средних [13]. Помимо классификации типов земного покрова оценивалась разделимость фрагментов изображений горящих и негорящих терриконов.

В исследовании использовались 15 фрагментов мультиспектрального изображения класса "Терриконы" (из которых 5 – горящие), и соответственно 10 фрагментов классов "Городская застройка" и "Зеленые насаждения".

**Анализ результатов**

Сходство объектов различных классов оценивалось на основе построения квадратной матрицы расстояний между векторами корреляционных характеристик. Наилучшая разделимость классов "Терриконы" и "Городская застройка" достигнута в случае вычисления евклидова, корреляционного расстояния и расстояния по Манхеттену. Фрагменты изображений классов "Терриконы" и "Зеленые насаждения" демонстрируют минимальное сходство при расчете значений евклидова расстояния и расстояния по Манхеттену (рис. 3). Меры косинусного и корреляционного расстояний для классов "Терриконы" и "Зеленые насаждения" не позволили достичь их полной разделимости.

		Евклидово расстояние					
		Терриконы			Городская застройка		
Терриконы	T <sub>1</sub>	0,00	0,06	0,15	0,82	1,00	1,26
	T <sub>2</sub>	0,06	0,00	0,10	0,77	0,95	1,21
	T <sub>3</sub>	0,15	0,10	0,00	0,67	0,86	1,12
Городская застройка	B <sub>1</sub>	0,82	0,77	0,67	0,00	0,32	0,66
	B <sub>2</sub>	1,00	0,95	0,86	0,32	0,00	0,63
	B <sub>3</sub>	1,26	1,21	1,12	0,66	0,63	0,00

а)

		Евклидово расстояние					
		Терриконы			Зеленые насаждения		
Терриконы	T <sub>1</sub>	0,00	0,06	0,15	1,49	1,17	1,01
	T <sub>2</sub>	0,06	0,00	0,10	1,45	1,13	0,97
	T <sub>3</sub>	0,15	0,10	0,00	1,36	1,04	0,87
Зеленые насаждения	P <sub>1</sub>	1,49	1,45	1,36	0,00	0,06	0,15
	P <sub>2</sub>	1,17	1,13	1,04	0,06	0,00	0,10
	P <sub>3</sub>	1,01	0,97	0,87	0,15	0,10	0,00

б)

Рис. 3. Матрицы евклидова расстояния между фрагментами мультиспектрального изображения различных классов: а) "Терриконы" и "Городская застройка"; б) "Терриконы" и "Зеленые насаждения"

Факторами, оказывающими влияние на результаты классификации, являются дата и время регистрации космоснимка, размер фрагмента изображения и дисперсия значений яркости пикселей. Увеличение размеров фрагмента повышает вероятность попадания в его пределы пиксе-

лей, относящихся к различным классам, что влечет снижение их разделимости.

Качество результатов кластеризации и классификации с обучением базировалось на расчете ошибок первого и второго рода [14] (табл. 4).

Таблица 4. Анализ результатов классификации

Ошибка, %	"Терриконы" и "Городская застройка"			"Терриконы" и "Зеленые насаждения"			Горящие и негорящие терриконы		
	Кластеризация к-средних	Nearest neighbor	ФМБ	Кластеризация к-средних	Nearest neighbor	ФМБ	Кластеризация к-средних	Nearest neighbor	ФМБ
<b>Корреляционные характеристики</b>									
Ошибка рода I	0	7	7	0	0	0	20	20	20
Ошибка рода II	0	10	0	0	20	20	30	20	20
<b>Каналы 10-14 мультиспектрального изображения Terra-ASTER</b>									
Ошибка рода I	20	20	20	0	0	0	20	60	40
Ошибка рода II	0	0	0	0	0	0	60	40	30

Сопоставление значений ошибок первого и второго рода результатов классификации типов земного покрова по множеству корреляционных характеристик каналов мультиспектрального изображения для класса "Терриконы" с результатами, полученными для исходных значений каналов изображения, позволяет сделать следующие выводы:

– корреляционные характеристики превосходят исходные данные в соответствии с показателями ошибки первого рода при классификации с обучением для классов "Терриконы" и "Городская застройка" и позволяют получить безошибочный результат кластеризации;

– в случае выделения горящих и негорящих терриконов точность классификации по набору корреляционных характеристик на 40% превосходит точность классификации на основе исходных данных по показателю ошибки первого рода (метод ближайшего соседа) и на 30% – по показателю ошибки второго рода (кластеризация) (табл.4).

В результате кластеризации по набору корреляционных характеристик горящими ошибочно признаны действующие терриконы ОП "Шахта Холодная Балка", ОП "Шахта им. С.М. Кирова" и АП "Шахта им. Засядько". Их сходство с горящими терриконами свидетельствует о

возможности протекания на отдельных их участках процессов тления и горения углесодержащих пород.

### Выводы

1. Разработана информационная технология классификации терриконовых ландшафтов на основе расчета корреляционных характеристик каналов мультиспектрального изображения.

2. Предложен подход к классификации фрагментов изображений ландшафтов по множеству корреляционных характеристик.

3. Результаты экспериментальных исследований подтвердили целесообразность применения корреляционных характеристик фрагментов мультиспектральных изображений к решению задачи классификации типов земного покрова и разделению объектов классов "Терриконы" и "Зеленые насаждения", "Терриконы" и "Городская застройка", а также горящих и негорящих терриконов.

4. Актуальным является вопрос создания критериев отнесения фрагментов изображений к классам "Горящий террикон" и "Негорящий террикон" в случае их слабой делимости.

### Список литературы

1. Смирный М.Ф., Зубова Л.Г., Зубов А.Р. Экологическая безопасность тер-

риконовых ландшафтов Донбасса: Монография. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2006. – 232 с.

2. *Kuenzer C., Zhang J., Tetzlaff A., Dijk P., Voigt S., Mehl H., Wagner W.* Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China // *Applied Geography*. – 2007. – 27. – P. 42–62.

3. *Stolle F., Chomitz K.M., Lambin E.F., Tomich T.P.* Land use and vegetation fires in Jambi Province, Sumatra, Indonesia // *Forest Ecology and Management*. – 2003. – 179. – P. 277–292.

4. *Voigt S., Tetzlaff A., Zhang J., Kunzer C., Zhukov B., Strunz G., Oertel D., Roth A., Dijk P., Mehl H.* Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 121–136.

5. *Ma W., Chen Y., Zhou J., Gong adu.* Quantitative analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship based on remote sensing // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2008. – XXXVII(B6b). – P. 261–264.

6. *Бусыгин Б.С., Сергеева Е.Л.* Сравнительный анализ двух статистических алгоритмов обработки текстурных изображений // *Науковий вісник НГУ*, – 2006. – 3. – С. 77–83.

7. *Busygin B., Garkusha I., Sergieieva K.* Using the space survey data for fire objects monitoring of the Donetsk coal basin // *International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010, 12<sup>th</sup>*. Prague, Czech Republic, May 24–26, 2010: Proceedings. – Prague: Lesnicka prace, 2010. – P. 25–30.

8. National aeronautics and space administration // Эл. ресурс. URL: [http://terra.nasa.gov/About/ASTER/about\\_aster.html](http://terra.nasa.gov/About/ASTER/about_aster.html)

9. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера. – 2010. – 560 с.

10. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера. – 2007. – 584 с.

11. *Дуда Р., Харп Р.* Распознавание образов и анализ сцен: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 512 с.

12. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing. Boston: Prentice Hall, 2002. – 793 p.

13. *Hong Zhou, Yonghuai Liu.* Accurate integration of multi-viewrange images using k-means clustering // *Pattern Recognition*. – 2008. – 41. – P. 152–175

14. *Nguyen Q.H., Rayward-Smith V.J.* Internal quality measures for clustering in metric spaces // *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*. – 2008. – 1(3). – P. 4–29.

Подано до редакції 19.11.2010