

*С.Г. АНТОЩУК*, д-р. техн. наук, ОНПУ (г. Одесса),  
*О.Ю. БАБИЛУНГА*, ОНПУ (г. Одесса),  
*А.А. НИКОЛЕНКО*, канд. техн. наук, ОНПУ (г. Одесса)

## **ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБРАЗОВ ОБЪЕКТОВ**

Запропонована модель формування образів ієрархічної структури з урахуванням семантичної значущості рівнів і об'єктів, що забезпечує паралельне розпізнавання об'єктів на необхідних рівнях ієрархії відповідно до мети обробки.

The model of images formation of hierarchical structure taking into account the semantic importance of levels and objects is offered. It provides parallel recognition of objects on the required levels of hierarchy in accordance with the purpose of processing.

**Постановка проблемы.** На современном этапе во многих практических приложениях, таких как контроль качества промышленных изделий, медицинская диагностика, биометрическая идентификация, экологический мониторинг и др., используются интеллектуальные системы обработки и распознавания изображений (ИСОРИ), в которых объект распознавания имеет иерархическую структуру: "объект – подобъект – ... – элементарный подобъект". Однако на практике при выборе или разработке моделей, методов и алгоритмов обработки и распознавания изображений не учитываются геометрические особенности структуры и размеры объекта распознавания. Это приводит к усложнению алгоритмов и систем, ухудшению их оперативности. Поэтому построение моделей и методов, позволяющих учесть иерархическую структуру объекта, является актуальным.

**Анализ литературы.** Анализ существующих иерархических (пирамиды, квадрантные деревья и сигнально-семантическая модель) структур данных и соответствующих методов обработки [1 – 4] показал, что одним из перспективных путей является применение сигнально-семантической модели и методов контурной сегментации в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования (ГВП) [5, 6].

**Цель статьи** – разработка модели формирования образов иерархической структуры, которая позволяет реализовывать восходящий и нисходящий подходы к декомпозиции изображения, и обеспечить параллельное распознавание на требуемых уровнях иерархии в соответствии с целями обработки.

**Модель формирования образов объектов иерархической структуры.** Для широкого круга задач, в которых объект распознавания имеет иерархическую структуру, процесс распознавания проводят на разных уровнях

детализации объекта в зависимости от поставленной задачи. Для анализа и оценки формы таких объектов применяют сигнально-семантическую модель контурного описания [5, 7]:

$$KP(x, y) = KP^{(1)}(x, y) \cup KP^{(2)}(x, y) \cup \dots \cup KP^{(k)}(x, y), \quad (1)$$

где  $KP(x, y)$  – иерархическое представление контурных препаратов;  $KP^j(x, y)$  – контурный препарат на  $j$ -м уровне иерархии;  $k$  – количество уровней иерархии.

Однако в модели (1) не учитывается цель обработки, определяющая степень детализации, а значит и необходимость получения контурных препаратов, и, следовательно, описаний контуров объектов на разных уровнях детализации. Поэтому предлагается ввести параметр  $\lambda_j > 0$ , определяющий семантическую значимость каждого уровня иерархии для получения описания объекта в целом и тогда выражение (1) преобразуется к виду

$$KP(x, y) = \bigcup_{j=1}^k \lambda_j KP^j(x, y). \quad (2)$$

В этом случае в результате проведения процедуры выделения контуров может быть получен маркированный контурный препарат, в котором точки контура каждого уровня иерархии помечены разными числовыми значениями, что может быть использовано в ИСОРИ на этапе анализа и распознавания структуры объекта. Методы контурной сегментации в пространстве ГВП [6] обеспечивают регулируемую детализацию объекта иерархической структуры, т.е. зависимость значений локальных экстремумов интенсивности подчеркнутого изображения, как от высоты перепада исходного изображения, так и от геометрических размеров объекта. Данное свойство позволяет учесть априорную информацию об объекте и выполнить разметку контурных препаратов с учетом размеров объектов.

Переходя к контурному описанию  $\mathbf{K}$ , как к совокупности начальных векторов контурных признаков, для учета цели получения информации предлагается ввести  $\lambda_{ji}$  – параметр семантической значимости  $i$ -го объекта (подобъекта) на  $j$ -м уровне иерархии (в случае присутствия на данном уровне только одного объекта данный параметр определяет значимость всего уровня) (рис. 1)

$$\mathbf{IKO} = \bigcup_{j=1}^M \bigcup_{i=1}^{N_j} (\mathbf{K}_{ji})_{\lambda_{ji}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{K}_{ji}$  – упорядоченное множество точек с координатами  $\{x_{iq}^j, y_{iq}^j\}$  контура некоторого  $i$ -го объекта на плоскости на уровне  $j$ ;  $M$  – число уровней;  $N_j$  – количество объектов и подобъектов;  $\lambda_{ji}$  – значимость  $i$ -го объекта на  $j$ -м уровне (от 0 до  $N$ ).

На множествах  $\mathbf{K}$  определено отношение принадлежности, при котором один или несколько подобъектов располагается внутри другого объекта или подобъекта.

Таким образом, на основании теоретико-множественного подхода, формально модель иерархического объекта может быть представлена в виде

$$\mathbf{IKO} = \{J, \Lambda, I, \chi, \mathbf{K}\}, \quad (4)$$

где  $J$  – множество уровней иерархии;  $\Lambda$  – множество значений семантической значимости уровней иерархии;  $I$  – множество подобъектов;  $\chi$  – отношение принадлежности, при котором один или несколько подобъектов располагается внутри другого объекта или подобъекта;  $\mathbf{K}$  – множество описаний отдельных объектов (подобъектов) в виде множества контурных признаков.

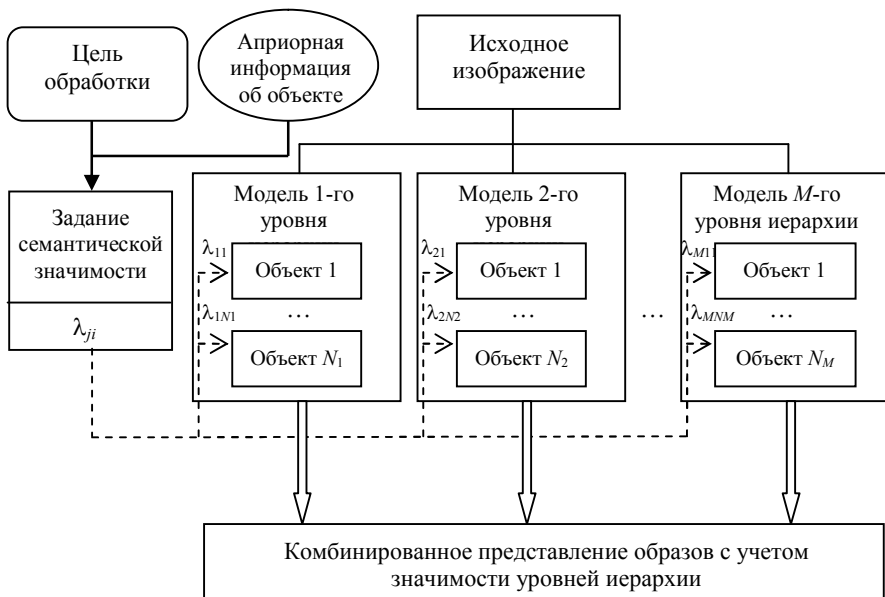


Рис. 1. Модель формирования образов объектов иерархической структуры с учетом семантической значимости уровней и объектов

На этапе распознавания выполняется процедура анализа значений семантической значимости (см. рис. 1), присвоенных каждому контурному описанию. Распознавание объекта, представленного моделью иерархического контурного описания, выполняется в первую очередь по признакам контурного описания с наивысшим значением семантической значимости с последующим уточнением (в случае неудовлетворительного результата

классификации) классификации по признакам, вычисленным для контурных описаний с меньшими значениями  $\lambda_{ji}$ .

### **Локализация перепадов интенсивности с использованием ГВП.**

Существует множество практических приложений ИСОРИ, в которых исходная визуальная информация представлена в виде объектов иерархической структуры, а выходное описание дает геометрическое представление об объекте в целом или его элементах или формирует классификационное решение. Для повышения оперативности таких систем устраняют избыточность информации, извлекая наиболее существенную. Базовой процедурой при этом является контурная сегментация изображений, позволяющая получить контурное описание изображения. Процедура иерархической контурной сегментации проводится в два этапа: локализация области контура и морфологическая обработка (получение контурного описания). Целью первого этапа является поиск на изображении области, в которой находится контур объекта распознавания. Для того, чтобы реализовать эту процедуру как правило, необходимо [1,3]:

- расширить пространственную локализацию объекта до границ изображения;

- подчеркнуть перепад интенсивности объекта;

- найти область контура.

Предложено осуществлять локализацию перепадов интенсивности с использованием ГВП. ГВП для решения задачи иерархической контурной сегментации обладает рядом важных свойств:

- ГВП позволяет совместить расширение пространственной локализации объекта с подчеркиванием перепадов интенсивности и использовать итеративные поисковые алгоритмы для нахождения области контура;

- обладая частотно-избирательными свойствами, ГВП позволяет регулировать детальность объектов;

- помехоустойчивость методов контурной сегментации растет с увеличением масштаба ГВП.

Проанализируем особенности локализации перепадов интенсивности с использованием ГВП.

В общем виде вейвлет-преобразование функции  $f(x) \in L^2(R)$  определяется следующим образом

$$Wf(s, x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-x}{s}\right) dt, \quad (5)$$

где  $\psi\left(\frac{t-x}{s}\right)$  – вейвлет, полученный на основании базисной функции  $\psi(t)$  с помощью сдвига и изменения масштаба;  $t$  – переменная интегрирования;  $s$  – масштабный коэффициент (для локализации перепада интенсивности может не учитываться).

Основываясь на [8, 9] базисные функции ГВП для разных масштабов  $s$  можно представить в виде (см. рис. 2):

$$\psi(t,s) = \begin{cases} 0, & t < -\gamma s; \\ -\frac{1}{1 + \frac{t+1}{s}}, & -\gamma s \leq t \leq -\varepsilon; \\ 0, & -\varepsilon < t < \varepsilon; \\ \frac{1}{1 + \frac{t-1}{s}}, & \varepsilon \leq t \leq \gamma s; \\ 0, & t > \gamma s. \end{cases} \quad (6)$$

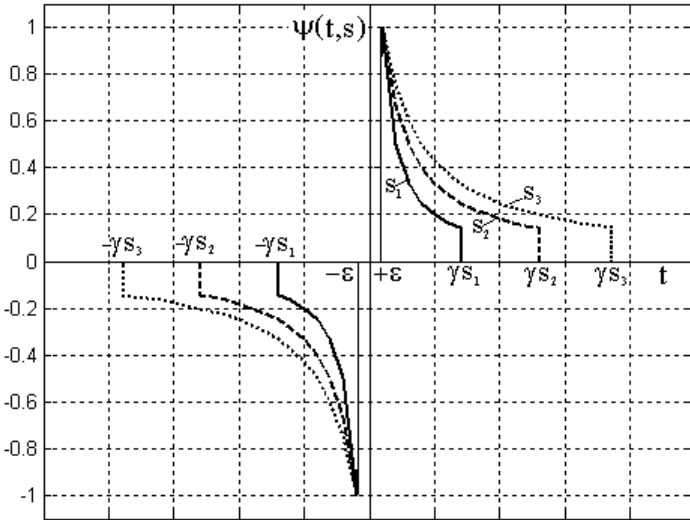


Рис. 2. Базисные функции ГВП для разных масштабов  $s$

Представим модель идеального перепада интенсивности в строке изображения в виде

$$f(x) = h \cdot 1(x - x_0), \quad (7)$$

где  $1(x - x_0)$  – единичная функция Хевисайда;  $x_0$  – координата перепада.

ГВП такой функции с учетом свойства функции Хевисайда  $1(-x) = 1 - 1(x)$  и компактности носителя вейвлета имеет вид

$$Wf(s, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h \cdot 1(x - x_0 - \tau) \psi(\tau) d\tau = h \int_{-\gamma s}^{\gamma s} \psi(\tau) d\tau - h \int_{-\gamma s}^{\gamma s} 1(\tau - (x - x_0)) \psi(\tau) d\tau. \quad (8)$$

После преобразований с учетом нечетности функции  $\psi(\tau)$  получим:

$$Wf(s, x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 - \gamma s; \\ - \int_{x-x_0}^{x_0-x} h\psi(\tau) d\tau, & x_0 - \gamma s \leq x \leq x_0 + \gamma s; \\ 0, & x > x_0 + \gamma s. \end{cases} \quad (9)$$

Обозначив через  $F(t)$  первообразную базисной вейвлет-функции, полагая постоянную интегрирования равной 0,

$$F(t) = \int \psi(t, s) dt = \begin{cases} 0, & t < -\gamma s; \\ s \ln \left| 1 - \frac{t+1}{s} \right|, & -\gamma s \leq t \leq -\varepsilon; \\ 0, & -\varepsilon < t < \varepsilon; \\ s \ln \left| 1 + \frac{t-1}{s} \right|, & \varepsilon \leq t \leq \gamma s; \\ 0, & t > \gamma s, \end{cases} \quad (10)$$

имеем

$$Wf(s, x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 - \gamma s; \\ -hF(\gamma s) + hF(x - x_0), & x_0 - \gamma s \leq x \leq x_0 + \gamma s; \\ 0, & x > x_0 + \gamma s. \end{cases} \quad (11)$$

Полученная функция локализована в окрестности точки  $x_0$ , в этой окрестности производная  $\frac{\partial Wf(s, x)}{\partial x} = h\psi(x - x_0)$  равна нулю на отрезке  $[-\varepsilon, +\varepsilon]$ . Следовательно, функция  $Wf(s, x)$  имеет экстремальное значение в диапазоне  $[-\varepsilon, +\varepsilon]$ , который является областью локализации перепада интенсивности

$$Wf(s, x)_{\text{экстр}} = -hF(\gamma s) + hF(\varepsilon) = -h \ln \left( \frac{s + \gamma s - 1}{s + \varepsilon - 1} \right). \quad (12)$$

Следует отметить, что на практике границы объекта могут быть размыты вследствие расфокусировки аппаратуры, предварительной обработки изображения низкочастотными фильтрами. Поэтому представляет интерес модель протяженного перепада

$$f(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < x_0; \\ \frac{h}{d}(x - x_0), & x_0 \leq x \leq x_0 + d; \\ h, & x_0 + d \leq x \leq x_{\text{max}}, \end{cases} \quad (13)$$

или

$$f(x) = \frac{h}{d}((x-x_0)(1(x-x_0)-1(x-x_0-d)) + h \cdot 1(x-x_0-d) - h \cdot 1(x-x_{\max})). \quad (14)$$

Если выполняется условие

$$2\gamma s < x_0 < x_0 + d < x_{\max} - 2\gamma s, \quad (15)$$

то влияние краевых эффектов можно не учитывать. Тогда при определении координат перепада последним слагаемым можно пренебречь и (14) представить в виде:

$$f(x) = -x_0 \frac{h}{d} \cdot 1(x-x_0) + 1(x-x_0-d) \left( x_0 \frac{h}{d} + h \right) + \frac{h}{d} x [1(x-x_0) - 1(x-x_0-d)]. \quad (16)$$

Выполнив преобразования аналогично (7) – (11) получим ГВП первых двух слагаемых выражения (16):

$$\begin{aligned} Wf_1(s, x) = & x_0 \frac{h}{d} (F(\gamma s) - F(x-x_0)) \cdot [1(x-(x_0-\gamma s)) - 1(x-(x_0+\gamma s))] - \\ & - (x_0 \frac{h}{d} + h) (F(\gamma s) - F(x-x_0-d)) \cdot [1(x-x_0-d+\gamma s) - 1(x-x_0-d-\gamma s)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Выполним ГВП третьего слагаемого (16) с учетом компактности носителя:

$$\begin{aligned} Wf_2(s, x) = & \frac{h}{d} \int_{-\infty}^{\infty} (x-\tau) [1(x-\tau-x_0) - 1(x-\tau-x_0-d)] \psi(\tau) d\tau = \\ = & \frac{h}{d} x (F(\gamma s) - F(x-x_0-d)) \cdot [1(x-x_0-d+\gamma s) - 1(x-x_0-d-\gamma s)] - \\ & - \frac{h}{d} x (F(\gamma s) - F(x-x_0)) \cdot [1(x-x_0+\gamma s) - 1(x-x_0-\gamma s)] - \\ & - \frac{h}{d} \left\{ (x-x_0) F(x-x_0) - (x-x_0-d) F(x-x_0-d) - \right. \\ & \left. - \int_{x-x_0-d}^{x-x_0} F(\tau) d\tau \right\} \cdot [1(x-x_0-d+\gamma s) - 1(x-x_0-d-\gamma s)]. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, ГВП функции (16) с учетом (17) и (18) имеет вид:

$$Wf(s, x) = Wf_1(s, x) + Wf_2(s, x). \quad (19)$$

Рассмотрим сумму (19) на отрезке  $[x-x_0-d+\gamma s, x-x_0-\gamma s]$ . С учетом свойств функции Хевисайда после алгебраических преобразований получим

$$Wf(s, x) = -hF(\gamma s) - \frac{h}{d} \int_{x-x_0-d}^{x-x_0} F(\tau) d\tau. \quad (20)$$

Найдем экстремум полученной функции, продифференцировав (20) по  $x$  и приравняв производную нулю

$$\frac{\partial Wf(s, x)}{\partial x} = -\frac{2h}{d}(F(x-x_0) - F(x-x_0-d)) = 0. \quad (21)$$

Предположим, что  $2\varepsilon < d < \gamma s$ ,  $x-x_0 > \varepsilon$ ,  $x-x_0-d < -\varepsilon$ . Тогда, воспользовавшись выражением для первообразной (10), выражение (21) можно представить в виде:

$$F(x-x_0) - F(x-x_0-d) = s \ln \left| 1 + \frac{x-x_0-1}{s} \right| - s \ln \left| 1 - \frac{x-x_0-d+1}{s} \right| = 0, \quad (22)$$

откуда

$$s + x - x_0 - 1 = s - x + x_0 + d - 1. \quad (23)$$

Из уравнения (23) находим  $x^* = x_0 + \frac{d}{2}$ . Полученное значение соответствует середине линейного перепада протяженностью  $d$  с началом в точке  $x_0$  и его значение не зависит от масштаба вейвлета  $s$ . Следовательно, при достаточно больших масштабах – носитель вейвлета  $2\gamma s$  должен перекрывать интервал длительности  $d$  протяженного перепада – координата экстремума вейвлет-преобразования совпадает с координатой середины протяженного перепада. Если же условие  $2\gamma s > d$  не выполняется, то ГВП имеет наибольшее значение в некотором диапазоне с центром в точке  $x_{\text{экстр}} = x_0 + \frac{d}{2}$ , как в случае идеального перепада.

Таким образом, особенности ГВП позволяют использовать его для локализации как идеальных, так и протяженных перепадов интенсивности.

На рис. 3 представлено для иллюстрации подчеркивание идеального (а) и протяженного (б) перепадов интенсивности с помощью ГВП и результат двукратного ГВП.

**Получение контурного описания.** Предложено для проведения морфологической контурной обработки полутоновых изображений и получения контурного описания объектов иерархической структуры использовать методы поиска на основе ГВП. Для разработки метода морфологической обработки полутоновых изображений объектов иерархической структуры в пространстве ГВП предлагается учитывать следующее:

1. Для установления сходства пикселей контура величину отклика оператора ГВП  $W(x_1, x_2)$  [10] с учетом дискретного характера изображения и фильтра ГВП определяют в виде дискретной свертки



$$W_1(x_{1p}, x_{2q}) = \sum_{i=-\gamma s}^{i=\gamma s} u(x_{1p-i}, x_{2q}) \Psi_i, \quad W_2(x_{1p}, x_{2q}) = \sum_{i=-\gamma s}^{i=\gamma s} u(x_{1p}, x_{2q-i}) \Psi_i.$$

2. Свойство непрерывности контура: при небольших – до 3-х пикселей разрывах каждая последующая точка должна лежать в пределах детерминированной, например, единичной окружности по отношению к найденной точке контура.

3. Поскольку определение области контура находится с использованием итеративных методов, то при выборе начального приближения  $x_k$  предлагается использовать значения, полученные на предыдущем шаге.

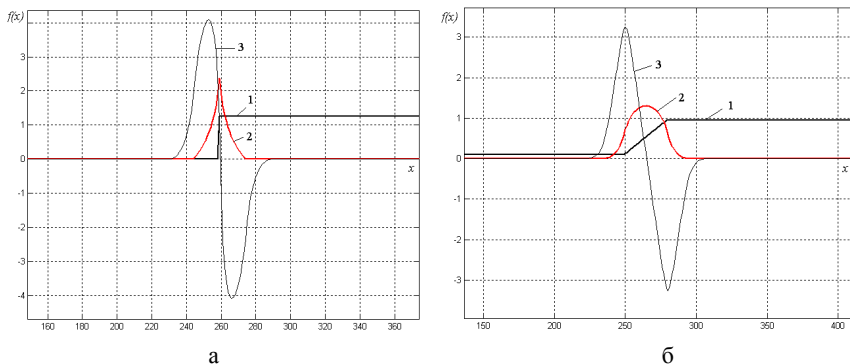


Рис. 3. Подчеркивание идеального (а) и протяженного (б) перепадов интенсивности: 1 – модель перепада; 2 – перепад в пространстве ГВП; 3 – результат двукратного ГВП перепада

Это позволяет получить последовательное описание контура путем пространственной морфологической обработки исходного изображения [11]. Пиксель изображения, принадлежащий контуру и имеющий координаты  $(x_{10}, x_{20})$  считается сходным по модулю оператора ГВП с пикселем  $(x_1, x_2)$ , если

$$\Delta W = |W(x_1, x_2) - W(x_{10}, x_{20})| \leq E,$$

где  $W(x_1, x_2) = \sqrt{W_{x_1}(x_1, x_2)^2 + W_{x_2}(x_1, x_2)^2}$ ;

$W(x_{10}, x_{20}) = \sqrt{W_{x_1}(x_{10}, x_{20})^2 + W_{x_2}(x_{10}, x_{20})^2}$ ,  $E$  – некоторая константа (порог).

В этом случае морфологический оператор связывания точек контура  $X$  для полутоновых изображений имеет вид:

$$X_k = (X_{k-1} - b) | WF(X_k) = \max(WF(X_{k-1} - b)) \& \& (\Delta WF(X_k) < E); \quad b \in B; \quad X_k \in D_F,$$

где  $b$  – смещение;  $\mathbf{B}$  –  $n$ -компонентная маска;  $D_f$  – область определения изображения  $F$ .

По полученным описаниям объектов  $\mathbf{K}$  на основании модели процесса формирования образов объектов и иерархической модели формирования образов с учетом семантической значимости (3), (4) рассчитываются векторы признаков  $\mathbf{C}^j$ , соответствующие разным объектам. Комбинирование моделей позволяет проводить как классификацию на основе вектора признаков  $\mathbf{C}^j$ , полученного в зависимости от соотношения между признаками разного уровня иерархии, так и независимую классификацию по вектору признаков на каждом уровне иерархии и принятие на ее основе окончательного классификационного решения.

**Выводы.** Иерархическая модель формирования образов объектов с учетом семантической значимости уровней представления позволит создавать гибкие (нисходящие, восходящие, комбинированные) модели обработки изображений, избежать необходимости многократного сопоставления полученной информации с большим числом моделей в процессе классификации объектов, получить универсальный подход для решения широкого круга прикладных задач.

**Список литературы:** 1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 2. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с. 3. Pratt W.K. Digital image processing. – USA: John Wiley & Sons, 2001. – 750 с. 4. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2003. – 784 с. 5. Антощук С.Г. Теоретические и реализационные основы создания адаптивно-критериальных систем построения информационных технологий обработки визуальной информации в АСУ // Автореф. дис. докт. техн. наук, Одес. нац. политехн. ун-т, Одесса, 2005. – 34 с. 6. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Выделение контуров объектов методом двукратного гиперболического преобразования // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2005. – Вип. 65. – С. 65–69. 7. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Ткаченко Е.В. Иерархический подход при контурном анализе изображений // Искусственный интеллект – ПІІІ "Наука і освіта". – 2005. – № 34. – С. 605–603. 8. Клих Ю.А., Антощук С.Г., Николенко А.А. Адаптивные базисные функции вейвлетного преобразования // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2004. – Вип. 2 (22). – С. 121–125. 9. Полякова М.В., Крылов В.Н. Морфологический метод контурной сегментации изображений на основе репагулярного вейвлет-преобразования // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2006. – Вип. 1 (25). – С. 98–103. 10. Антощук С.Г., Клих Ю.А., Николенко А.А., Бабилунга О.Ю. Обоснование метода поиска экстремума при наличии помех с использованием гиперболического вейвлет-преобразования. Зб. наук. праць / Одеський ордену Леніна інститут Сухопутних військ. – Вип. 13 (Ч. 1). – Одеса: ООЛІСВ, 2007. – С. 5–11. 11. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Метод морфологической обработки полутоновых изображений на основе гиперболического вейвлет-преобразования // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 67. – С. 119–123.

Поступила в редакцию 12.10.2007