
ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.93"1, 004.932

С. Ю. МИРОШНИЧЕНКО, В. С. ТИТОВ

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ТЕНЕЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Представлен метод локализации теней геопространственных объектов, позволяющий повысить точность автоматизированного формирования тематических слоев электронных карт геоинформационных систем на основе аэрокосмических изображений. Повышение точности достигается за счет устранения формируемых тенями ложных объектов с использованием методов цифровой обработки изображений.

Ключевые слова: геоинформационные системы, аэрокосмические изображения, автоматическая векторизация, тени объектов, пространственное дифференцирование, функция Гаусса, кластеризация.

Современные геоинформационные системы (ГИС) обеспечивают эффективное решение различных задач, возникающих в разных сферах деятельности человека [1]. Широкое применение ГИС обуславливает необходимость поддержания в актуальном состоянии их информационной основы — банка электронных карт (ЭК). Решение данной задачи предполагает как создание новых ЭК, так и обновление существующих с использованием различных источников информации: географических и топографических карт, кадастровых документов, а также наземных, авиационных и космических снимков [2]. Очевидно, что последние позволяют получить наиболее полную информацию об исследуемом участке местности, достаточную для формирования основных тематических слоев ЭК.

Автоматизированное формирование тематических слоев ЭК по цифровому авиационному или космическому изображению основано на использовании различных методов обработки растровых изображений (контурных, кластерных, частотных), обеспечивающих локализацию и построение контурных представлений геопространственных объектов [3]. Однако применение указанных методов к аэрокосмическим изображениям сопряжено с трудностями, вызванными их излишней информативностью и, в частности, наличием теней объектов местности. При использовании контурных, кластерных или частотных методов обработки изображений тени формируют ложные объекты, что вызвано значительным различием яркостей тени и окружающего фона и, как следствие, резким перепадом яркости на границе тени с фоном и объектом. Следовательно, актуальной является задача локализации теней объектов на аэрокосмическом изображении для устранения их негативного влияния на точность формируемых в результате автоматизированной обработки тематических слоев ЭК.

Тень (s) объекта (S_i) на аэрокосмическом изображении $I = f(x, y)$, $x = \overline{1, M}$, $y = \overline{1, N}$, представляет собой область $S_i^{(s)}$, примыкающую к объекту местности (рис. 1, $a, б$)

и обладающую однородной внутренней структурой (изменения яркости в пределах области незначительны):

$$S_i^{(s)} = s_i^{(s)}(x, y), S_i^{(s)} \in I. \quad (1)$$

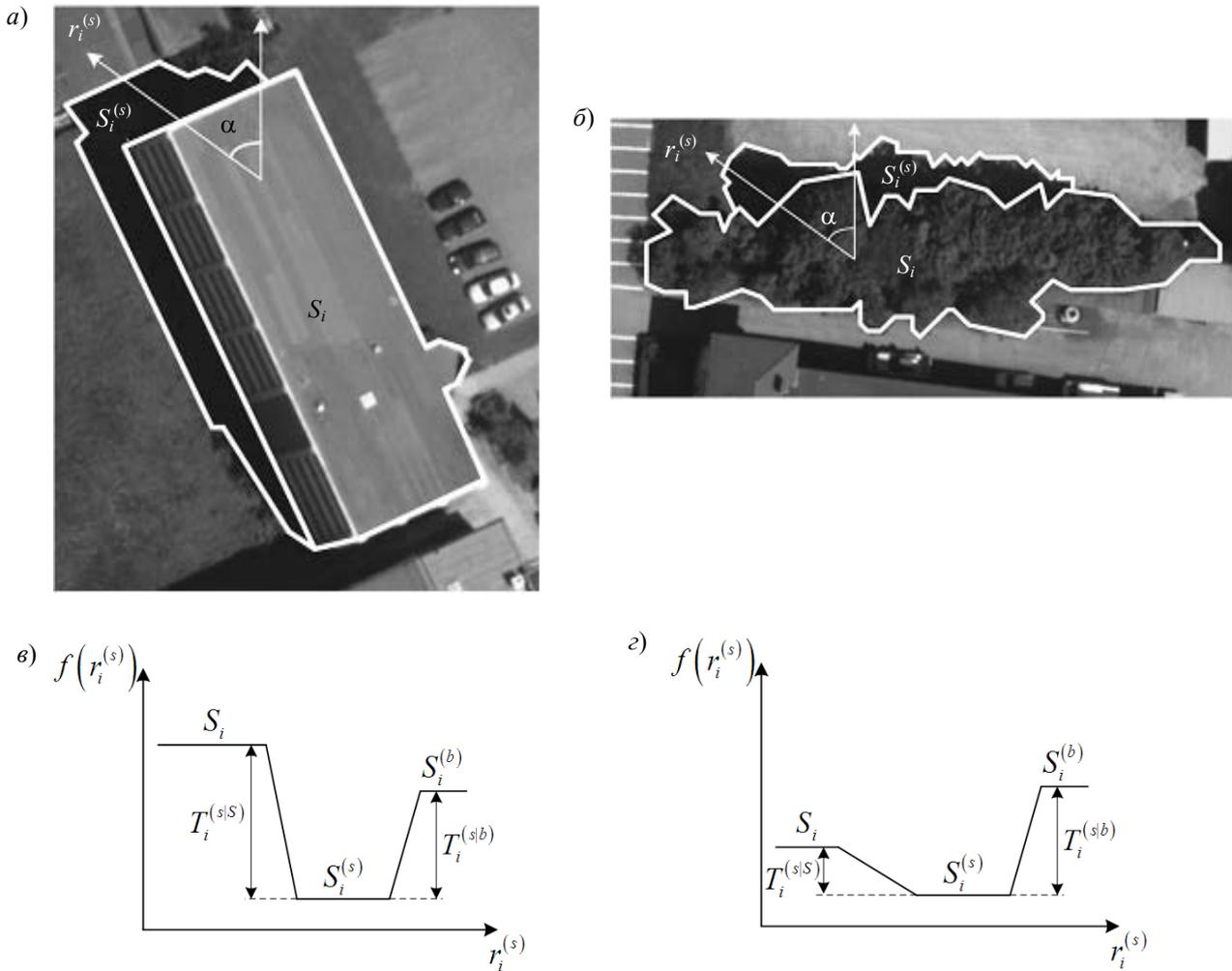


Рис. 1

Как видно из рис. 1, а, область тени $S_i^{(s)}$ искусственного объекта обладает меньшей средней яркостью по сравнению с самим объектом S_i и окружающим фоном:

$$\overline{f(S_i^{(s)})} < \overline{f(S_i)}, \quad \overline{f(S_i^{(s)})} < \overline{f(S_i^{(b)})}, \quad (2)$$

где $S_i^{(b)}$ — область фона, непосредственно примыкающая к области тени $S_i^{(s)}$.

Модули разностей средних яркостей тени и искусственного объекта $T_i^{(s|S)}$, а также тени и фона $T_i^{(s|b)}$ эквивалентны и их соотношение зависит от отражающих свойств объекта и фона:

$$T_i^{(s|S)} \equiv T_i^{(s|b)}, \quad T_i^{(s|S)} = \left| \overline{f(S_i^{(s)})} - \overline{f(S_i)} \right|, \quad T_i^{(s|b)} = \left| \overline{f(S_i^{(s)})} - \overline{f(S_i^{(b)})} \right|. \quad (3)$$

График функции яркости изображения яркости вдоль вектора $r_i^{(s)}$ (см. рис. 1, а), проведенного под углом α к нулевому азимуту и пересекающего границы объекта с тенью и тени с фоном, представлен на рис. 1, в.

Для природных объектов, например группы деревьев (см. рис. 1, б), также выполняется условие (2), однако значения $T_i^{(s|S)}$ и $T_i^{(s|b)}$ не эквивалентны (условие (3) не выполняется), поскольку среднее значение яркости объекта S_i незначительно превосходит яркость области тени $S_i^{(s)}$: см. рис. 1, з, откуда видно, что перепад яркости природного объекта на границе с его тенью является плавным и обладает меньшим значением модуля градиента функции яркости по сравнению с границей тени и фона.

Следовательно, характерным признаком наличия тени объекта любого типа является перепад яркости на границе тени с фоном. На основе данного признака можно произвести оценку положений теней объектов местности с использованием направленной двумерной дифференциальной функции Гаусса $G_\sigma^{(s)}(\bullet)$, повернутой на угол α , равный азимуту Солнца (рис. 2, а):

$$G_\sigma^{(s)}(x, y, \alpha) = \frac{-\left(x \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) - y \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right) \left(y \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2 - \left(x \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{\left(y \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2 - \left(x \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где σ — полуширина функции Гаусса $G_\sigma^{(s)}(\bullet)$, определяющая протяженность перепада функции яркости, при которой наблюдается наибольший по модулю отклик функции $G_\sigma^{(s)}(\bullet)$.

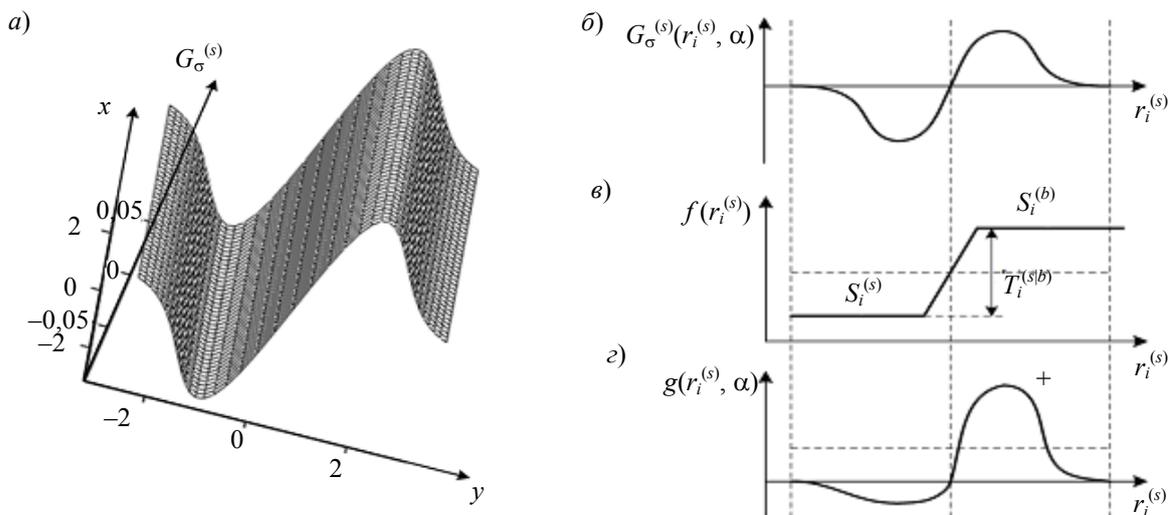


Рис. 2

Для оценки положения теней объектов исходное аэрокосмическое изображение I (рис. 3, а) подвергается свертке с функцией (4), в результате чего формируется дифференциальное изображение $D(\alpha) = d(x, y, \alpha)$ (см. рис. 3, б), на котором локальные максимумы отклика функции $G_\sigma^{(s)}(g)$ в направлении солнечного освещения соответствуют границам теней объектов с фоном:

$$D(\alpha) = \sum_{y^{(i)}=1}^N \sum_{x^{(i)}=1}^M G_\sigma^{(s)}\left(x^{(i)} - x, y^{(i)} - y, \alpha\right) f\left(x^{(i)}, y^{(i)}\right). \quad (5)$$

Применение функции (4) обусловлено тем, что она обеспечивает локальный максимальный положительный отклик (см. рис. 2, *з*) при положении центра оси симметрии $G_{\sigma}^{(s)}(g)$ (одномерный пример приведен на рис. 2, *б*) на границе тени с фоном (см. рис. 2, *в*) за счет свертки более яркой области фона на границе с тенью и положительной частью функции (4).

а)



б)

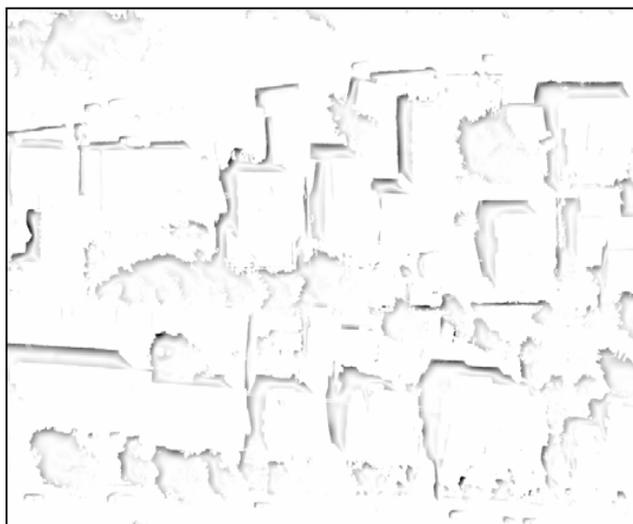


Рис. 3

Если азимут Солнца α неизвестен, его определение осуществляется с помощью преобразования Радона [4], которое заключается в построении фазовой развертки в диапазоне $[0, 2\pi]$ интегральных откликов $\mathfrak{R}^{(s)}(\varphi)$ функции (4) по всему изображению I :

$$\mathfrak{R}^{(s)}(\varphi) = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M d(x, y, \varphi), \quad \varphi \in [0, 2\pi]. \quad (6)$$

При наличии большого количества теней на аэрокосмическом изображении максимальный интегральный положительный отклик $\mathfrak{R}^{(s)}(\varphi)$ будет получен при $\varphi = \alpha$.

При цифровой обработке изображения функция (4) с помощью аппроксимации заменяется маской свертки, что обеспечивает меньшую вычислительную сложность операции (5) [4, 5]. Маска свертки $\mathbf{G}_{\sigma}^{(\varphi)} = \left\| g_{ij}^{(\varphi)} \right\|$, $i, j = \overline{1, 2N_{\mathbf{G}} + 1}$, для функции (4) представляет собой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [5], при этом предполагается, что функ-

ция ограничена размерами маски и за ее пределами не существует (равна нулю). В соответствии с функциями (5), (6) маска свертки $\mathbf{G}_\sigma^{(\varphi)}$ должна:

— обеспечивать возможность аппроксимации функции (4) при любом значении угла φ , что необходимо для построения фазовой развертки (6);

— при различных значениях угла φ иметь незначительно различающуюся сумму модулей элементов матрицы $\mathbf{G}_\sigma^{(\varphi)}$ (не более чем на $\varepsilon_G = 0,5\%$) для обеспечения возможности сравнения откликов фильтра при определении максимума функции (6).

В соответствии с рассмотренными свойствами наиболее подходящей является аппроксимация функции (4) внутри окружности с центром в начале координат и радиусом R (задается путем ограничения области определения функции), что позволяет построить КИХ-фильтр требуемой формы внутри классической квадратной маски. При этом элементы маски, лежащие за пределами области определения, принимают нулевые значения.

Значение параметра σ зависит от четкости теней (формы перепада функции яркости в области перехода тень—фон) и определяется эмпирически. Размер маски свертки, а следовательно, и радиус области определения функции (4) рассчитывается на основе средней длины тени на аэрокосмическом изображении, зависящей от пространственного разрешения изображения I .

Определение элементов маски свертки $\mathbf{G}_\sigma^{(\varphi)}$, для соблюдения условия постоянства суммы их модулей, производится таким образом, чтобы минимизировать влияние вращения функции (4) относительно узлов дискретной сетки при изменении угла φ . Для этого расчет каждого элемента $g_{ij}^{(\varphi)}$ на основе значения функции (4) производится не только по соответствующему узлу дискретной сетки, но и по квадратной области $P_{ij}^{(s)}$ с центром в данном узле:

$$g_{ij}^{(\varphi)} = \frac{1}{(2h+1)^2} \sum_{n=-h}^h \sum_{m=-h}^h G_\sigma^{(s)} \left(i + \frac{m}{2h}, j + \frac{n}{2h}, \varphi \right), \quad (7)$$

где $(2h+1)^2$ — количество узлов в пределах области $P_{ij}^{(s)}$, используемых для вычисления значения элемента $g_{ij}^{(\varphi)}$.

Рассчитанная маска свертки $\mathbf{G}_\sigma^{(\varphi)}$ применяется для построения карты откликов $D(\varphi)$ (см. формулу (5)) на исходном аэрокосмическом изображении I при определенном значении угла φ :

$$D(\varphi) = \sum_{i=-R}^R \sum_{j=-R}^R g_{ij}^{(\varphi)} f(x+i, y+j), \quad x = \overline{1, M}, \quad y = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Сформированное дифференциальное изображение $D(\alpha)$ представляет собой карту, отражающую оценку положений теней объектов. Локальный максимум (8) отклика функции свидетельствует о возможном присутствии в некоторой точке карты $D(\alpha)$ границы тени объекта с фоном. Область тени $S_i^{(s)}$ является замкнутой, в ее пределах функция яркости однородна, и, следовательно, для локализации теней наилучшим образом подходит кластерная функция [3]. В качестве признака кластерной функции выбран модуль разности яркости некоторой точки $p_{ij}^{(s)} = (x_{ij}^{(s)}, y_{ij}^{(s)})$, $p_{ij}^{(s)} \in I$, изображения и текущего среднего значения яркости кластера $C_i^{(s)}$:

$$T^{(s)} \left(p_{ij}^{(s)}, C_i^{(s)} \right) = \left| f \left(p_{ij}^{(s)} \right) - \overline{f \left(C_i^{(s)} \right)} \right|.$$

Начальное положение и форма кластера $C_i^{(s)}$, а также среднее значение его яркости определяются линией, проходящей внутри области тени $S_i^{(s)}$ вдоль ее границы с фоном.

Для того чтобы кластер $C_i^{(s)}$ принял форму области тени $S_i^{(s)}$, производится его наращение за счет точек изображения, непосредственно прилегающих к границе кластера. Некоторая точка $p_{ij}^{(s)}$, находящаяся на границе кластера $C_i^{(s)}$, присоединяется к нему в случае, если ее яркость $f(p_{ij}^{(s)})$ незначительно отличается от средней яркости кластера $\overline{f(C_i^{(s)})}$:

$$C_i^{(s)} = C_i^{(s)} \cup \{p_{ij}^{(s)}\} : T^{(s)}(p_{ij}^{(s)}, C_i^{(s)}) < T_i^{(s(b))} / 2.$$

Процесс поэтапного наращивания кластера представлен на рис. 4. Начальное положение кластера (рис. 4, а) определяется линией, смещенной от границы тени объекта с фоном на одну точку внутрь тени. Далее выполняется итеративное наращение кластера за счет присоединения точек изображения, расположенных на текущей границе кластера (см. рис. 4, б, в). Наращение кластера $C_i^{(s)}$ прекращается, если ни одна точка $p_{ij}^{(s)}$, находящаяся на его границе, не может быть присоединена к кластеру (см. рис. 4, г), поскольку не удовлетворяет условию (8).

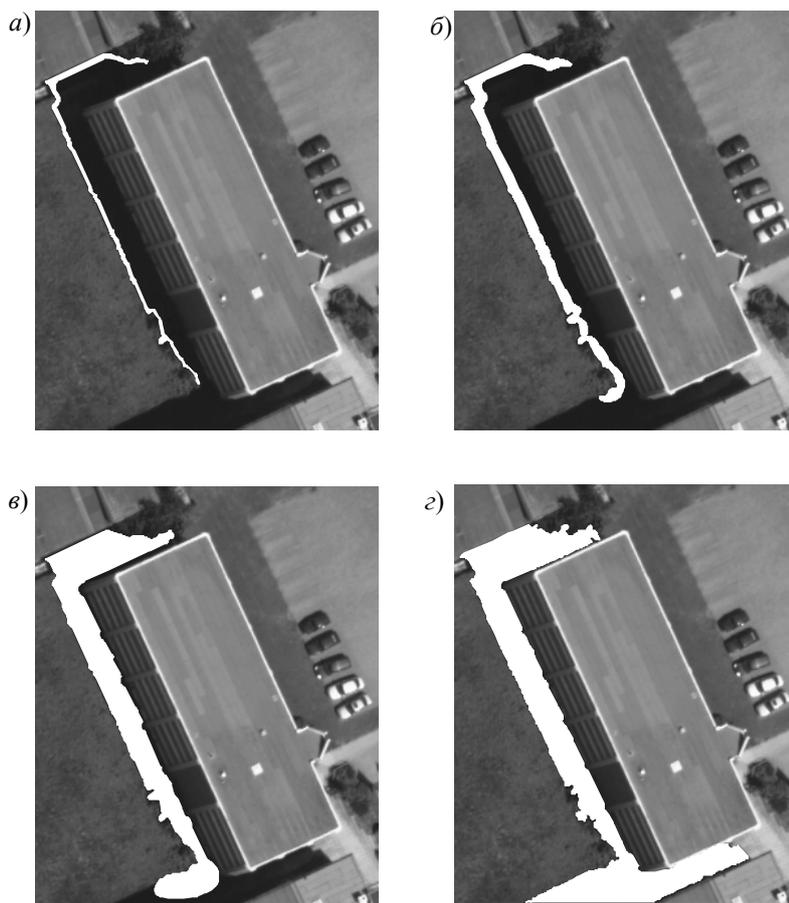


Рис. 4

В результате формируется множество кластеров $C^{(s)} = \{C_i^{(s)}\}, i = \overline{1, N_C}$, однако не все его элементы представляют собой тени объектов, так как кластеры создавались без учета яркостных характеристик теней (различие средних яркостей теней незначительно и им можно пренебречь). Для удаления кластеров, не являющихся тенями объектов местности, из множе-

ства $C^{(s)}$ исключаются элементы $C_i^{(s)}$, средние значения яркости которых лежат вне диапазона допустимых средних значений яркости тени:

$$C^{(s)} = C^{(s)} \setminus \left\{ C_i^{(s)} : \overline{f(C_i^{(s)})} \notin \left[M(S^{(s)}) \pm \sigma'(S^{(s)}) \right] \right\}, \quad i = \overline{1, N_C},$$

здесь M — операция определения математического ожидания; σ' — СКО.

Поскольку возможна ситуация, когда кластеры множества $C^{(s)}$ частично пересекаются, необходимо выполнить их объединение путем добавления в один из кластеров недостающих точек другого:

$$C_i^{(s)} = C_i^{(s)} \cup C_m^{(s)}, \quad C^{(s)} = C^{(s)} \setminus \left\{ C_m^{(s)} \right\}.$$

Каждый из сформированных кластеров $C_i^{(s)}$ преобразуется в контурное представление путем кодирования векторной последовательностью его границ и используется для исключения ложных объектов при контурной, кластерной или частотной обработке изображений, а также для определения высот соответствующих объектов (при известном угле места Солнца).

Таким образом, предложенный метод, предназначенный для устройств и систем автоматизированной векторизации аэрокосмических изображений [6, 7], позволяет определять положения теней объектов местности при полном отсутствии априорной информации об условиях получения изображения, а также обеспечивает повышение точности локализации и векторизации геопространственных объектов за счет устранения ложных объектов, формируемых тенями.

Работа выполнена при поддержке гранта НК-254П-6(7) в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Д. Е. Геоинформационные системы: исследование, анализ и разработка. М.: Гос. науч. центр РФ, ВНИИгеосистем, 2004. 184 с.
2. Мартыненко А. И. Информатика и электронная Земля: фундаментальные научные проблемы // Системы и средства информатики. М.: ИПИ РАН, 2001. Вып. 11. С. 94—112.
3. Miroshnichenko S. Yu. Buildings and structures preliminary identification on aerospace images using edges detection with local scale estimation // Proc. of the 9th Intern. Conf. "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies". Nizhni Novgorod, 2008. Vol. 2. P. 51—52.
4. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
5. Соифер В. А. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соифера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
6. Мирошниченко С. Ю., Титов В. С. Параллельно-конвейерное устройство для векторизации аэрокосмических изображений земной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 2. С. 45—51.
7. Пат. 2374684 РФ, МПК G06K9/46, G06F15/00. Параллельно-конвейерное устройство для векторизации аэрокосмических изображений земной поверхности / С. Ю. Мирошниченко, В. С. Титов, М. И. Труфанов. Опубл. 27.11.2009. Бюл. № 27.

Сведения об авторах

- Сергей Юрьевич Мирошниченко** — канд. техн. наук; Курский государственный технический университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: oldguy7@rambler.ru
- Виталий Семенович Титов** — д-р техн. наук, профессор; Курский государственный технический университет, кафедра вычислительной техники; E-mail: titov@vt.kstu.kursk.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
14.04.10 г.