

# Эффективность псевдоградиентной идентификации объектов схожей формы на бинарных и полутоновых изображениях

Р.Г. Магдеев<sup>1,2</sup>, А.Г. Ташлинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Телеком.ру», Рябикова 21Б, Ульяновск, Россия, 432045

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия 432027

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ эффективности применения метода псевдоградиентной идентификации по эталону объектов схожей формы по их полутоновым и бинарным изображениям. Идентификация объекта понимается как определение изображения объекта на исследуемом изображении с оцениванием его пространственных параметров по отношению к эталону. На примере базы полутоновых изображений СОИЛ-20 и их бинарных версий исследовано два типа схожих по форме объектов: имеющих разный характер кривизны линий, описывающих контур объекта, и с близкими характеристиками кривизны линий контура.

## 1. Введение

Задача распознавания образов, как на отдельных изображениях, так и на видеопоследовательностях возникает в самых разных областях: от военного дела и систем безопасности до оцифровки аналоговых сигналов. Проблема автоматизации решения этой задачи по-прежнему остаётся актуальной как точки зрения теории, так и технической реализации [1 - 3]. Распознавание образов, как правило, рассматривается как отнесение на основе исходных данных объекта на изображении к определенному классу (группе классов) путем сопоставлением выделенных существенных признаков, характеризующих данный класс. Основная сложность при этом состоит в установлении соответствия между выделенным на исследуемом изображении объектом и заданными шаблонами (изображениями эталонных объектов) на основе конечного набора некоторых свойств и признаков. Отметим, что можно выделить несколько направлений в распознавании образов:

- распознавание множества предварительно заданных объектов, или классов объектов на изображении;
- обнаружение объекта, реализуемое путем проверки изображения или его части на соответствие определённым условиям;
- идентификация на изображении объекта с оцениванием его параметров и принятием решения.

В работах [4, 5] показано, что идентификации изображений объектов по шаблону может быть сведена к поиску пространственного преобразования, которое минимизирует расстояние между искомым изображением и шаблоном в заданном метрическом пространстве, и предложен метод псевдоградиентной идентификации (МПГИ) объектов на бинарных

изображениях, который показал хорошую эффективность в сравнении с корреляционно-экстремальным методом [6] и методом контурного анализа [7]. В данной статье рассматривается эффективность МПГИ для полутоновых изображений, по сравнению с его использованием для бинаризованных изображений.

Для конкретности будем предполагать, что возможные деформации идентифицируемого объекта по отношению к шаблону можно свести к модели подобия [8, 9], то есть шаблон и изображение объекта могут отличаться коэффициентом масштаба  $\kappa$ , углом ориентации  $\varphi$  и сдвигами  $\vec{h} = (h_x, h_y)^T$  по базовым осям  $Ox$  и  $Oy$ , а также дополнительно аддитивным шумом. В качестве объектов исследования была использована база полутоновых изображений COIL-20, включающая изображения 1440 объектов [10]. При этом для каждого из полутонового изображения были получены их бинарные версии. Ряд примеров полутоновых изображений и их бинарных версий приведен на рисунке 1.

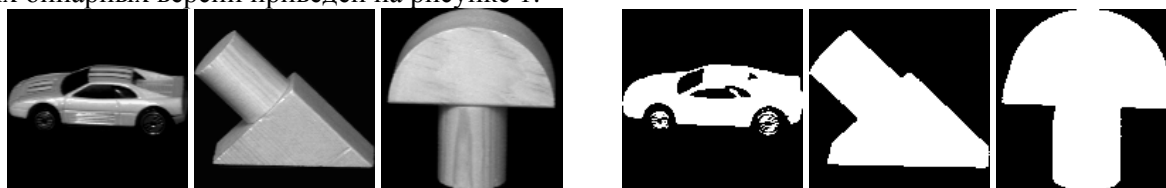


Рисунок 1. Пример полутоновых шаблонов (справа) и их бинарных версий (слева).

## 2. Описание метода идентификации

В МПГИ параметры  $\hat{\alpha}$  идентификации, на основе которых принимается решение, ищутся рекуррентно [11]:

$$\hat{\alpha}_t = \hat{\alpha}_{t-1} - \Lambda_t \bar{\beta}_t,$$

где  $\bar{\beta}_t$  - псевдоградиент целевой функции качества идентификации, зависящий от  $\hat{\alpha}_{t-1}$  и номера итерации  $t = \overline{0, T}$ ;  $\Lambda_t$  - матрица усиления [12];  $T$  - число итераций. В работах [11, 13] показано, что задаче идентификации в качестве целевой функции целесообразно применять коэффициент корреляции яркостей (КРЯ) или средний квадрат разности яркостей (СКРЯ) шаблона и исследуемого изображения, которые и были использованы в настоящей работе. Здесь и далее под шаблоном понимается эталонное изображение объекта. На каждой  $t$ -й итерации для нахождения очередной оценки вектора параметров  $\hat{\alpha}_t$  используется двумерная локальная выборка одноименных отсчетов шаблона и исследуемого изображения, как правило, небольшого объема [14].

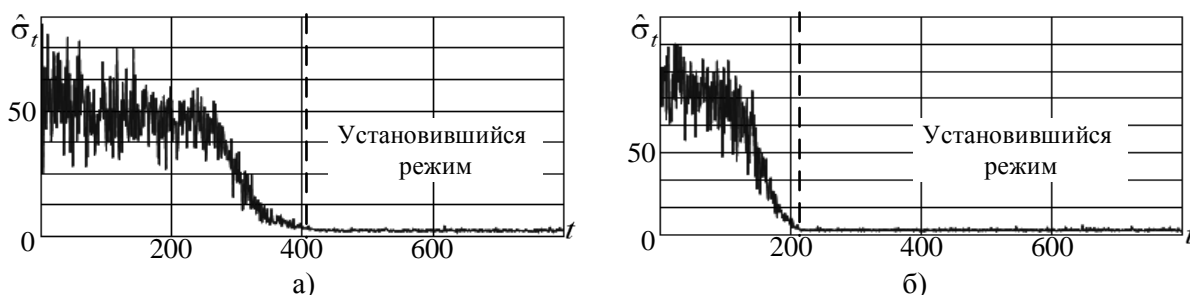
Эффективный рабочий диапазон оцениваемых параметров МПГИ (в котором оценки при заданном числе итераций не выходят за требуемый доверительный интервал) ограничен. Если он не покрывает область определения параметров, то для обеспечения покрытия требуется задание нескольких шаблонов с различными начальными приближениями параметров. Также в работах [4, 5] показано, что для повышения скорости сходимости оценок  $\hat{\alpha}$  и расширения рабочего диапазона к бинарным изображениям в качестве предобработки целесообразно применять низкочастотную фильтрацию, например, гауссову. Оптимальный размер маски гауссова фильтра для бинарных изображений составляет от 10% размера идентифицируемого объекта.

Исследования, проведенные с использованием полутоновых изображений из базы COIL-20, также показали целесообразность низкочастотной фильтрации. При этом оптимальный размер маски фильтра Гаусса, позволяющий расширить рабочий диапазон МПГИ при сохранении достоверности идентификации, составляет от 3% до 10% от размера объекта на изображении. Отметим также, что использовалась приближенная реализация фильтра Гаусса, предложенная в работах [15, 16] и основанная на бесконечной импульсной характеристике. Вычислительная

сложность использованного подхода не зависит от размера маски фильтра и составляет примерно  $16L_xL_y$  элементарных операций, где  $L_x$  и  $L_y$  – размеры изображения.

Вычислительная сложность псевдоградиентной процедуры оценивания параметров  $\vec{\alpha}$ , лежащая в основе МПГИ, исследована в работе [17] и составляет, в частности, для параметров модели подобия при использовании в качестве целевой функции СКРЯ от  $(22\mu + 25)T$  до  $(52\mu + 20)T$  элементарных операций (в зависимости от выбранного способа нахождения псевдоградиента целевой функции), а при использовании КРЯ - от  $(51\mu + 91)T$  до  $(69\mu + 48)T$  элементарных операций, где  $\mu$  - объем локальной выборки отсчетов на каждой итерации.

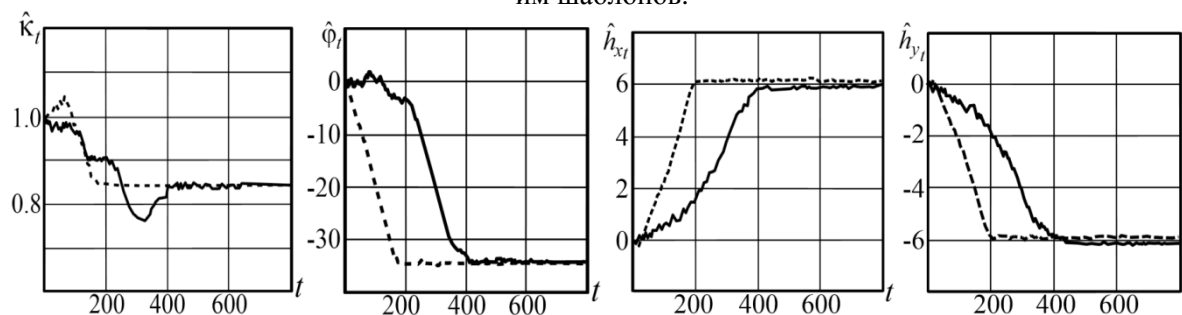
В качестве характеристики эффективности МПГИ для бинарных и полутоновых изображений используем сходимость среднеквадратического отклонения (СКО)  $\hat{\sigma}_t$  разностей яркостей модифицированного шаблона и исследуемого изображения, которое рассчитывается на каждой  $t$ -й итерации по локальной выборке отсчетов идентифицируемого изображения и шаблона,  $t = \overline{0, T}$ . Пример графиков сходимости  $\hat{\sigma}_t$  для левого объекта рисунка 1 (автомобиль) при параметрах рассогласования шаблона и исследуемого объекта:  $\kappa = 0,85$ ,  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\vec{h} = (h_x, h_y)^T = (6, -6)^T$  приведен на рисунке 2, где график (а) соответствует использованию полутонового изображения, а (б) - бинарного. Исследуемые изображения и соответствующие шаблоны приведены на рисунке 3, а графики сходимости оценок параметров идентификации – на рисунке 4, где сплошная линия соответствует полутоновым изображениям, а пунктирная - бинарным. Размеры изображений  $128 \times 128$  элементов, объем локальной выборки  $\mu = 15$ .



**Рисунок 2.** Сходимость СКО разностей яркостей модифицированного шаблона и исследуемого изображения для полутоновых (а) и бинарных (б) изображений.



**Рисунок 3.** Пример исследуемых полутонового и бинарного изображений и соответствующих им шаблонов.



**Рисунок 4.** Графики сходимости параметров идентификации.

Из графиков видно, что как оценки параметров идентификации  $\hat{\alpha}_i = (\hat{\kappa}_i, \hat{\phi}_i, \hat{h}_i)^T$ , так соответственно и  $\hat{\sigma}_i$ , так для данного объекта при использовании бинаризованных изображений и шаблоне сходится быстрее (примерно за 200 итераций), чем при полутоновых (примерно за 400 итераций). Объясняется это большим размером низкочастотного фильтра при предобработке изображений. Таким образом, как скорость сходимости оценок, так и эффективный рабочий диапазон при использовании полутоновых и бинаризованных изображений могут различаться. Особенно это относится к изображениям объектов, имеющих схожую форму.

### 3. Идентификация объектов, имеющих схожую форму

На примере объектов базы изображений COIL-20 рассмотрим два типа схожих по форме объектов: имеющих разный характер кривизны линий, описывающих контур объекта (примером могут служить объекты, приведенные на рисунке 5а), и с близкими характеристиками кривизны линий контура (пример таких объектов показан на рисунке 5б). На указанных рисунках приведены также бинарные версии изображений этих объектов. Очевидно, что исследуемые типы объектов критичны при обработке бинарных изображений.

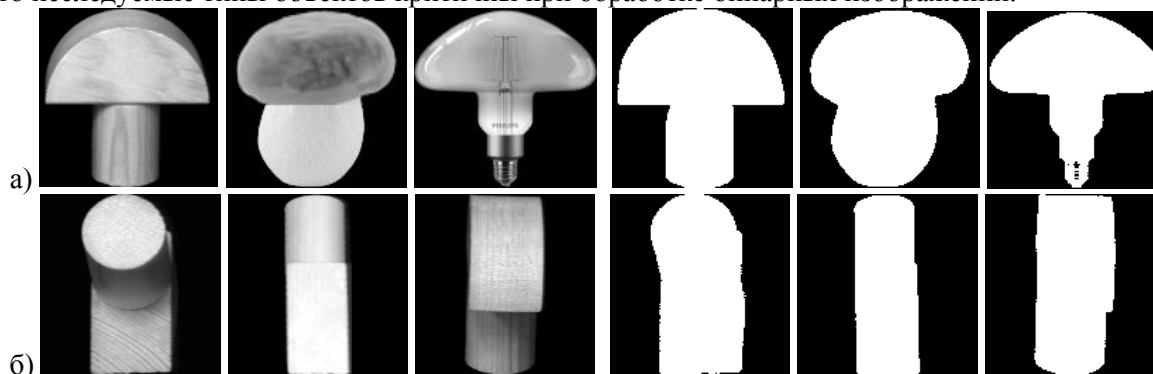


Рисунок 5. Примеры схожих по форме изображений, имеющих разные и близкие характеристики кривизны линий контура.

В эксперименте применялась методика идентификации, предложенная в [18] и основанная на трех критериях, один из которых использует коэффициент корреляции между исследуемым деформированным изображением объекта и преобразованными с помощью МПГИ шаблонами (назовем его условно основным). Два других критерия используют характеристики сходимости параметров идентификации (дополнительные критерии). Одной характеристикой является оценка среднего значения  $m_{\hat{\sigma}_i}$  СКО  $\hat{\sigma}_i$  разностей яркостей модифицированного шаблона и исследуемого изображения в установившемся режиме процесса оценивания МПГИ параметров идентификации, которая находится на итерациях установившегося режима. Другой характеристикой является СКО значений  $\hat{\sigma}_i$  на итерациях установившегося режима, которое обозначим через  $\delta_{\hat{\sigma}_i}$ . Установившийся режим процесса идентификации наглядно иллюстрируется рисунком 2. Решение об идентификации принимается, если выполняются все три критерия:  $R \geq R^n$ ,  $m_{\hat{\sigma}_i} \leq m_{\hat{\sigma}_i}^n$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_i} \leq \delta_{\hat{\sigma}_i}^n$ . Найденные по методике [18] пороговые значения критериев идентификации для используемой базы изображений составили:  $R^n = 0.92$ ,  $m_{\hat{\sigma}_i}^n = 9.16$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_i}^n = 4.63$ .

Для первого типа объектов получены следующие результаты. При бинаризованных изображениях коэффициент корреляции между изображением объекта и «правильным» шаблоном составляет  $R = 0,99$  и превышает пороговое значение. Для этой пары выполняются

и дополнительные критерии:  $m_{\hat{\sigma}_t} = 1.11 < m_{\hat{\sigma}_t}^n$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} = 0.69 < \delta_{\hat{\sigma}_t}^n$ . Однако коэффициент корреляции между изображением объекта и схожими шаблонами, преобразованными МПГИ, также превышает пороговое значение идентификации ( $R \approx 0,94$ ). При этом численные значения вспомогательных характеристик не достигают пороговых значений, хотя довольно близки к ним ( $m_{\hat{\sigma}_t} \approx 11$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} \approx 7,3$ ). Для полутоновых изображений коэффициент корреляции между изображением объекта и «правильным» шаблоном также равен 0,99 и превышает пороговое значение, а коэффициент корреляции со схожими шаблонами ( $R \approx 0,7$ ) существенно меньше порогового. Дополнительные критерии для «правильного» шаблона также выполняются ( $m_{\hat{\sigma}_t} = 1.21$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} = 0.27$ ), а для схожих шаблонов значения дополнительных характеристик существенно превышают пороговые ( $m_{\hat{\sigma}_t} \approx 17 > 9.61$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} \approx 15 > 4.63$ ). Таким образом, для данного типа объектов при бинаризации их изображений принятие решения об идентификации требует использования дополнительных критериев. Для полутоновых изображений принятие решение об идентификации возможно при использовании только основного критерия по коэффициенту корреляции, а дополнительные могут быть использованы для оценки достоверности идентификации.

Анализ применения МПГИ для бинарных изображений схожих по форме объектов второго типа показал, что все критерии идентификации выполняются, как для «правильного» шаблона, так и для схожих. Так, для «правильного» шаблона:  $R = 0,99$ ,  $m_{\hat{\sigma}_t} = 1.31 < m_{\hat{\sigma}_t}^n$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} = 0.89 < \delta_{\hat{\sigma}_t}^n$ , для схожих:  $R \approx 0,97$ ,  $m_{\hat{\sigma}_t} \approx 7.2 < m_{\hat{\sigma}_t}^n$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} \approx 1.4 < \delta_{\hat{\sigma}_t}^n$ . Для полутоновых изображений коэффициент корреляции между изображением объекта и «правильным» шаблоном превышает порог, но меньше, чем в остальных рассмотренных случаях ( $R = 0,96$ ). Значения дополнительных характеристик существенно ниже порога:  $m_{\hat{\sigma}_t} = 1.81 < m_{\hat{\sigma}_t}^n$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} = 1.74$ . Для схожих шаблонов критерий по коэффициенту корреляции не выполняется ( $R \approx 0,83$ ) и значения вспомогательных характеристик значительно превышают пороговые ( $m_{\hat{\sigma}_t} \approx 23.3$ ,  $\delta_{\hat{\sigma}_t} \approx 12.3$ ). Таким образом, для схожих по форме объектов с близкими характеристиками кривизны линий контура их идентификация по шаблону по бинаризованным изображениям неэффективна. При идентификации такого типа объектов по их полутоновым изображениям целесообразно применение использованных в работе дополнительных критериев.

При этом необходимо отметить, что эффективный рабочий диапазон МПГИ для изображений этого типа существенно снижается. Так, при выборе в качестве параметров идентификации параметров модели подобия, для рассмотренных изображений он составляет:  $\kappa = 0,8...1,1$ ;  $\varphi = -10^0...+10^0$ ;  $h = -5...+5$  пикселей. Обусловлено это тем, что такие изображения отличаются в основном текстурой, а процедура предварительной низкочастотной фильтрации сглаживает текстуру, поэтому размер маски фильтра предобработки не превышает 3% размера объекта.

#### 4. Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что расширение МПГИ на полутоновые изображения не ухудшает его показателей по вычислительной сложности, но немного снижает эффективный рабочий диапазон и скорость сходимости параметров идентификации. Обусловлено это тем, что при одной и той же достоверности идентификации объектов полутоновые изображения допускают при предобработке меньший размер низкочастотного фильтра.

Исследование на базе изображений COIL-20 идентификации схожих по форме объектов, имеющих разный характер кривизны описывающих контур объекта линий, показало, что при

близких характеристиках кривизны линий контура идентификация по бинаризованным изображениям неэффективна. При идентификации по полутоновым изображениям целесообразно для повышения достоверности использовать кроме корреляционного критерия дополнительных, основанных на характеристиках процесса сходимости параметров идентификации. Для схожих по форме объектов, имеющих разные характеристики кривизны линий контура, при бинаризации их изображений принятие решения об идентификации также требует использования дополнительных критериев. Для полутоновых изображений решение возможно при использовании только корреляционного критерия, а дополнительные могут быть использованы для оценки достоверности идентификации.

Отметим также, что для решения задачи идентификации объектов по шаблону критерий, основанный на корреляции и именуемый в данной работе «основным», таковым по своей значимости для идентификации является далеко не всегда.

## 5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 19-29-09048 и № 19-47-730004.

## 6. Литература

- [1] Борзов, С.М. Исследование эффективности классификации трудноразличимых типов растительности по гиперспектральным изображениям / С.М. Борзов, М.А. Гурьянов, О.И. Потатуркин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 464-473. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-464-473.
- [2] Полтавский, А.В. Основы распознавания образов с помощью средств вычислительной техники / А.В. Полтавский, А.В. Гриншкун // Двойные технологии. – 2017. – № 2. – С. 55-66.
- [3] Курочкин, С.В. Распознавание гомотопического типа объекта с помощью дифференциально-топологических инвариантов аппроксимирующего отображения // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 611-617. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-611-617.
- [4] Магдеев, Р.Г. Эффективность идентификации объектов на бинарных изображениях с использованием процедур псевдоградиентной адаптации / Р.Г. Магдеев, А.Г. Ташлинский // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 96-102.
- [5] Magdeev, R.G. Efficiency of object identification for binary images / R.G. Magdeev, A.G. Tashlinskii // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 277-281. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-277-281.
- [6] Ковалевский, В.А. Методы оптимальных решений в распознавании изображений / В.А. Ковалевский – М.: Наука, 1976. – 328 с.
- [7] Фурман, Я.А. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений / Я.А. Фурман, А.Н. Юрьев, В.В. Яншин – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 248 с.
- [8] Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
- [9] Ташлинский, А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений / А.Г. Ташлинский – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 132 с.
- [10] Nene, S.A. Columbia Object Image Library (COIL-20) / S.A. Nene, S.K. Nayar, H. Murase [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/software/softlib/coil-20.php> (01.12.2019).
- [11] Tashlinskii, A.G. Pseudogradient Estimation of Digital Images Interframe Geometrical Deformations / A.G. Tashlinskii – Vision Systems: Segmentation & Pattern Recognition, 2007. – С. 465-494. DOI: 10.5772/4975.
- [12] Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, Физматлит, 1995. – 336 с.
- [13] Tashlinskii, A.G. The specifics of pseudogradient estimation of geometric deformations in image sequences / A.G. Tashlinskii // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2008. – Vol. 18(4). – С. 700-705. DOI: 10.1134/S1054661808040275.

- [14] Ташлинский, А.Г. Адаптивное формирование объёма локальной выборки в псевдоградиентных процедурах оценивания межкадровых геометрических деформаций изображений / А.Г. Ташлинский, Г.Л. Минкина, Г.В. Дикарина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – Т. 3, № 35. – С. 53-58.
- [15] van Vliet, L.J. Recursive Gaussian Derivative Filters / L.J. van Vliet, I.T. Young, P.W. Verbeek // Proc. 14th Int. Conference on Pattern Recognition, 1998. – P. 509-514. DOI: 10.1109/ICPR.1998.711192.
- [16] Hale, D. Recursive Gaussian filters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inside.mines.edu/~dhale/papers/Hale06RecursiveGaussianFilters.pdf>.
- [17] Фадеева, Г.Л. Оптимизация псевдоградиента целевой функции при оценивании межкадровых геометрических деформаций изображений: дис. канд. техн. наук: 05.13.18. – Ульяновск, 2008. – 167 с.
- [18] Ташлинский, А.Г. Повышение достоверности идентификации объектов на бинарных изображениях / А.Г. Ташлинский, Р.Г. Магдеев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 24-30.

## Efficiency of pseudo-gradient identification of similar shape objects in binary and grayscale images

R.G. Magdeev<sup>1</sup>, A.G. Tashlinskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Telekom.ru LLC, Ryabikova str. 21B, Ulyanovsk, Russia, 432045

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets str. 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

**Abstract.** In this paper, a comparative analysis of the effectiveness of the method of pseudogradient identification by the standard of objects of similar shapes by their grayscale and binary images is carried out. The identification of the object is understood as the definition of the image of the object in the image under study with the assessment of its spatial parameters in relation to the reference. Using the COIL-20 grayscale image database and their binary versions as an example, it was investigated two types of objects of similar shape: those with different and similar character of the curvature of the object contour lines.