

# Оценка схожести следов бойков огнестрельного оружия по их цифровым изображениям

В.А. Федоренко, М.В. Корнилов

**Аннотация.** В работе рассматриваются двумерные изображения следов бойков с индивидуализирующими признаками в виде пятен произвольной формы. Предложен комбинированный алгоритм сравнения признаков, включающий сравнение объектов методом потенциальных функций и методом контурного анализа. Сравнение проводится по дескрипторам, не зависящим от ориентации изображений. Показана возможность прогнозирования вероятной вариативности индивидуальных признаков на цифровых изображениях следов бойков путем их бинаризации по разным уровням и фиксации изменения характеристик Эйлера. Эффективность предложенного алгоритма апробирована на массиве, состоящем из 120 цифровых изображений однотипных следов. Предложенный метод может быть использован в качестве самостоятельного для проведения проверок по массиву цифровых изображений следов бойков, а также в качестве предварительного, например, для одного из корреляционных методов. Работа представляет интерес для разработчиков программного обеспечения автоматизированных баллистических идентификационных систем.

**Ключевые слова:** идентификация оружия, следы бойков, цифровые изображения, пространство признаков, контурный анализ, дескрипторы

## Введение

Проведение проверок в автоматическом режиме по массивам цифровых изображений следов бойков огнестрельного оружия является актуальной задачей, связанной с оперативным выявлением связи между местом преступления и конкретным экземпляром оружия. Однако автоматизация процесса сравнения цифровых изображений следов серьезно осложняется следующими обстоятельствами: во-первых, многообразием типов особенностей рельефа, индивидуализирующих следы бойков; во-вторых, вариативностью следов одного и того же бойка на различных гильзах; в-третьих, наличием микроскопических неоднородностей поверхности капсюля, не связанных с рельефом бойка, например, следов производства капсюля.

В настоящее время разрабатываются методы обработки и сравнения как 2-мерных, так и 3-мерных изображений следов бойков. Основным математическим приемом сравнения является нахождение функции взаимной корреляции, которую находят либо для всей поверхности изображений [1], либо отдельных частей сравниваемых изображений [2]. Другие приемы сравнения, например, методом выделения особых точек [3], мало эффективны при анализе изображений с высокой вариативностью признаков.

Рассмотренные методы носят универсальный характер, однако их применение для сравнения изображений следов бойков со всеми типами индивидуальных признаков не эффективно. Поэтому авторами данной работы ранее были выделены основные типы индивидуаль-

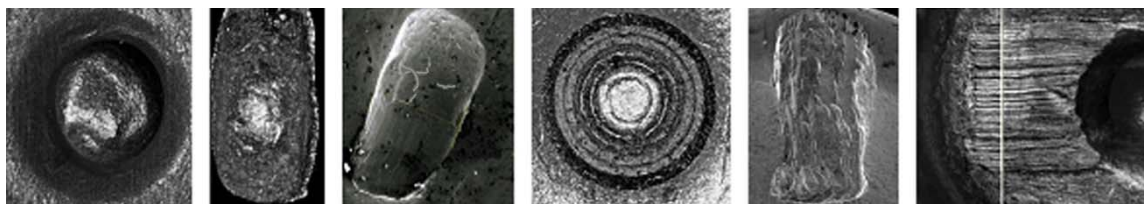


Рис. 1. Следы бойков с основными типами доминирующих признаков

ных особенностей рельефа следов бойков (Рис. 1), которые наиболее часто встречаются на практике и предложено для каждого из них разработать свой эффективный алгоритм обработки и сравнения изображений [4].

Известно, что лучшим «инструментом» для сравнения следов является человек, алгоритм его действий достаточно рационален. На первом этапе он выделяет морфологический тип доминирующих признаков, индивидуализирующий данный след, далее сравнивает только с теми тестовыми объектами, которые имеют схожую структуру признаков. Сначала сравниваются характеристики признаков, которые визуально легко фиксируются и не зависят от ориентации изображений. К ним можно отнести площадь признака, вытянутость (периметр), число крупных признаков и т.д. Затем анализируются особенности конфигурации границ признаков. Только после этого при необходимости проводится сравнение распределенных в пространстве локальных топографических особенностей рельефов следов бойков, представляющих собой локальные максимумы и минимумы, перевалы и т.д. Однако скорость сравнения мала и проверка по большому массиву (несколько тысяч объектов) занимает много времени.

В данной работе рассматриваются двумерные изображения с признаками в виде пятен произвольной формы, линейные размеры которых больше неоднородностей (шероховатостей) поверхности капсюля (Рис. 2).

Целью статьи является разработка алгоритма сравнения следов бойков, эффективность которого не зависит от ориентации исследуемых изображений. В работе проводится оценка эффективности предложенного алгоритма.

Предложенный алгоритм является комбинированным, включающим сравнение объектов методом потенциальных функций и методом вычисления нормированного скалярного про-

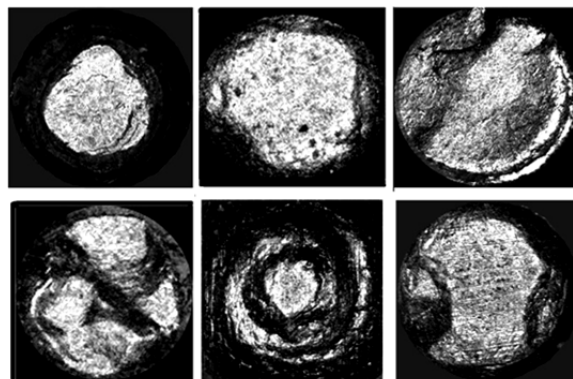


Рис. 2. Характерные признаки в виде пятен произвольной формы в следах бойков

изведения контуров выделенных признаков. При этом результаты сравнения не зависят от ориентации исследуемых изображений. Алгоритм близок к последовательности действий эксперта, которые он производит при сравнении изображений с таким морфологическим типом особенностей до этапа анализа локальных неоднородностей рельефа следов бойков.

Предложенный алгоритм был реализован с помощью пакета прикладных программ Matlab R2008b с использованием модуля Image Processing Toolbox.

## 1. Оценка схожести изображений в признаковом пространстве

На предварительном этапе проводится сглаживание паразитных неоднородностей поверхности капсюля с помощью низкочастотных фильтров [2, 5], что приводит к формированию изображений со сглаженным рельефом (Рис. 3 а, б). Такие изображения легко могут быть переведены в бинарный вид с сохранением особенностей признаков, обусловленных их формой (Рис. 3 в). Исследование двумерных изображений следов бойков с признаками в виде пятен произвольной формы, которые по

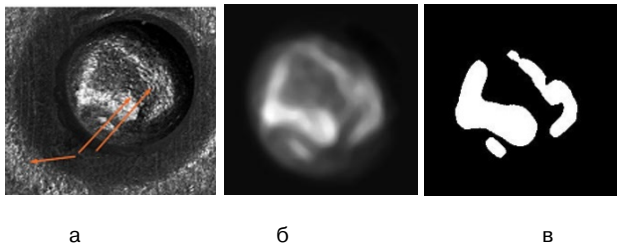


Рис. 3. Сглаживание локальных топографических неоднородностей следов бойков

а – исходное изображение с топографическими неоднородностями следа бойка (отмечены стрелками), не связанными с рельефом поверхности бойка; б – результат применения сглаживающего фильтра; в – выделенные признаки в бинарном виде

площади намного больше, чем шероховатости поверхности капсуля, позволяет сгладить изображения без потери идентификационных особенностей рельефа.

Изображения следов бойков с пространственным разрешением 250x250 пикселей в градациях серого были получены с помощью баллистического сканера «POISC». Из-за сложной формы следов бойков изображения имеют неоднородную засветку. Поэтому предварительно проводилось выравнивание освещения исходных изображений методом гомоморфной обработки изображений [5].

Изображение можно представить в виде умножения двух сигналов – высокочастотного, содержащего информацию о топографических особенностях изображения, и низкочастотного, определяемого плавным изменением освещенности в пространстве. Улучшение изображения заключается в нормализации его яркости и увеличении контрастности. Путём гомоморфной обработки эту задачу можно свести к линейной. Для этого вычислялся логарифм от изображения, который равен:

$$\log(f(x, y)) = \log(f_{high}(x, y)) + \log(f_{low}(x, y)), \quad (1)$$

где  $f(x, y)$  – функция яркости исследуемого изображения, где  $x, y$  – пространственные координаты;  $f_{high}(x, y)$ ,  $f_{low}(x, y)$  – высокочастотная и низкочастотная составляющие исследуемого изображения.

Для формирования изображения с уменьшенной низкочастотной составляющей вычислялась экспонента от высокочастотной состав-

ляющей и складывалась в определенной пропорции с исходным изображением:

$$F(x, y) = K \cdot f(x, y) + L \cdot e^{\log(f_{high}(x, y))}, \quad (2)$$

где  $K, L$  – экспериментально подбираемые коэффициенты;  $F(x, y)$  – изображение с выровненной яркостью.

Данный метод хорошо себя зарекомендовал для предварительной обработки двумерных изображений следов бойков. В целом, изображение с выровненной яркостью более удобно как для бинаризации, так и для последующего его визуального анализа экспертом (Рис. 4).

Вычисление различных дескрипторов по изображениям, представленным в градациях серого, является достаточно сложной задачей. Поэтому проводилось преобразование исходных изображений в бинарные. В данной работе белым цветом обозначены признаки следа бойка, а чёрным – фон. Адаптивную бинаризацию изображений с выровненным освещением проводили методом Ниблэка [6]. Данный метод позволяет варьировать порог бинаризации  $V(x, y)$  от точки к точке в зависимости от локального значения стандартного отклонения  $\sigma(x, y)$ :

$$V(x, y) = \mu(x, y) + k \cdot \sigma(x, y) \quad (3)$$

где  $\mu(x, y)$  – математическое ожидание;  $k$  – коэффициент, определяющий, какую часть границы объекта взять в качестве самого объекта.

При бинаризации изображений следов бойков размером 250x250 пикселей использовалось окно размером не менее 51x51 пиксель,  $k=0.2$ . Признаки с малой площадью исключали из анализа.

Для описания бинарных изображений следов бойков использовались следующие де-

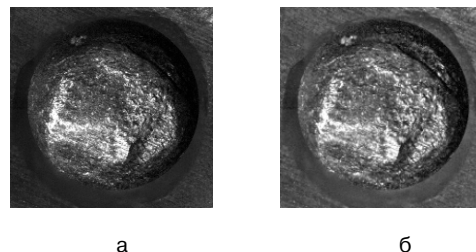


Рис. 4. Метод гомоморфной обработки изображения

а - исходное изображение;  
б - изображение с выровненной яркостью

скрипторы выделенных признаков, не зависящие от ориентации изображений: площадь ( $S$ ), периметр ( $P$ ), максимальный и минимальный моменты инерции ( $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ). Deskрипторы формируют так называемое признаковое пространство [7], а сравнение координат признаков ( $S$ ,  $P$ ,  $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ) позволяет делать предварительную оценку подобия изображений следов. Это существенно сокращает количество вычислений при первичном сравнении, т.к. требуется оценить вектор, содержащий 4 значения, а не рассчитывать функцию кросс-корреляции для полутонных или бинарных изображений.

Для сравнения векторов признаков рассчитывалось Евклидово расстояние от исследуемого объекта до каждого тестового:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^M [A_i - B_{ij}]^2}, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  исследуемый и тестовый объекты соответственно;  $i$  – номер компоненты вектора признаков (площадь, периметр, и т.д.);  $j$  – порядковый номер объекта из тестового массива.

Выбранные дескрипторы имеют разную размерность ( $m$ ,  $m^2$  и т.д.) и большой разброс абсолютных значений. Чтобы уравнивать их вклад в подсчет расстояния (4), разброс значений дескрипторов был нормирован. Для этого абсолютные значения дескрипторов линейно переводили в интервал (0, 1). Для лучшей иллюстративности результатов расчетов проводили перенормировку расстояний по формуле:

$$\varphi_j = \ln(1 + d_j). \quad (5)$$

Исследования, проведенные по массиву из 120 следов бойков с индивидуальными признаками в виде пятен произвольной формы показали, что в приоритетный список, включающий 20% объектов тестового массива, входит «парный» след (след бойка оставлен тем же экземпляром оружия, что и исследуемый) с вероятностью около 99%, если такой присутствует в базе данных. Для дальнейшего сокращения рекомендательного списка проводился анализ отобранных изображений следов по дескрипторам, описывающим форму доминирующих признаков. К таким дескрипторам относятся контуры, построенные по внешней границе выделенных признаков.

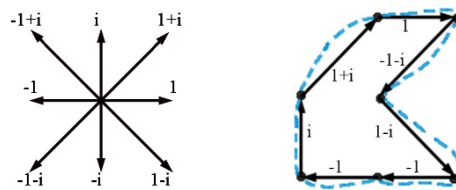


Рис. 5. Кодировка единичными комплексными векторами

а - система координат; б - описание границы объекта комплексными координатами, граница объекта обозначена пунктиром

## 2. Применение контурного анализа для оценки схожести формы признаков

Для представления признаков в виде контуров, граница каждого признака описывалась элементарными векторами, которые соединяли точки в соответствии с направлениями 8-связной системы (Рис. 5 а). Координатами элементарных векторов являются комплексные числа:  $i$ ;  $1+i$ ;  $1$ ;  $1-i$ ;  $-i$ ;  $-1-i$ ;  $-1$ ;  $-1+i$ . Контур, кодируемый таким образом (Рис. 5 б), обладает следующими замечательными свойствами: максимальное значение модуля нормированного скалярного произведения  $|\eta|$  двух произвольных контуров  $\Gamma$  и  $N$  (6) инвариантно их повороту, положению на плоскости и масштабу [8]. Максимум модуля нормированного скалярного произведения (НСП) указывает на степень сходства контуров, а аргумент указывает на угол их разориентации. Модуль нормированного скалярного произведения контуров лежит в пределах от 0 до 1.

$$|\eta| = \frac{|(\Gamma, N)_{C^k}|}{\|\Gamma\| \|N\|}. \quad (6)$$

Изрезанность границ бинаризованных изображений исследуемых признаков значительно усложняет алгоритм построения их контуров. Поэтому предварительно границы признаков сглаживались медианным фильтром размером 13x13. На Рис. 6 представлены результаты бинаризации исходного изображения без применения медианного фильтра и с его применением. Видно, что во втором случае границы стали гладкими, а форма признака при этом сохранилась.

Для оценки эффективности сравнения признаков методом контурного анализа были вы-

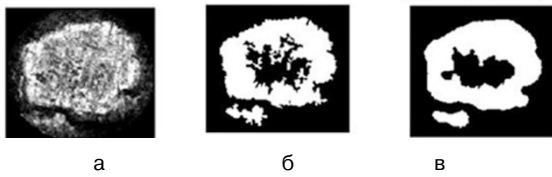


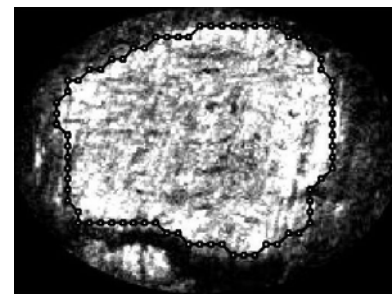
Рис. 6. Применение медианной фильтрации для сглаживания границ признаков

а – исходное изображение; б – бинарное изображение полученное без применения медианного фильтра; в – бинарное изображение после применения медианного фильтра размером 13x13

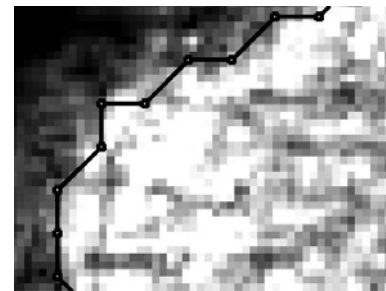
браны следы с близкими значениями дескрипторов  $S, P, I_{max}, I_{min}$ . В соответствии с методикой, описанной в работе [8], граница признака была аппроксимирована комплексными элементарными векторами, которые могут иметь только 8 ориентаций на плоскости (Рис. 4 а). Предварительный анализ признаков с достаточно сложной конфигурацией границ показал, что оптимальным является их описание 70-80 векторами. При проведении расчетов признаки описывались 72 векторами. На Рис. 7 а, б) в качестве примера представлено изображение следа бойка и фрагмент границы признака с нанесенными в автоматическом режиме комплексными векторами. Видно, что границы признака достаточно корректно описываются элементарными комплексными векторами.

В Табл. 1 представлены результаты оценки схожести границ индивидуальных признаков, проведенные с помощью контурного анализа. Представленные здесь следы имеют следующую нумерацию: первое число означает экземпляр оружия, число в скобках определяет порядковый номер гильзы, стреляной в данном экземпляре оружия. Для отработки методики расчетов использовались изображения следов бойков на гильзах, стреляных в пистолете Макарова и автомате АК-74. Расчеты показали, что применение контурного анализа позволяет выделить признаки с близкими по форме контурами и существенно сократить приоритетный список. Вероятность включения парного следа в первую пятерку номеров приоритетного списка порядка 96%. Положительную статистику несколько ухудшают следы с контурами, по форме близкими к окружности (Табл.1 и Рис. 8).

Контурный анализ позволяет также установить угол разориентации контуров относительно



а



б

Рис. 7. Аппроксимация границы признака 72 комплексными векторами

а – выделенный контур всего признака  
б – фрагмент контура признака

но друг друга, который определяется по известной формуле для аргумента комплексных чисел:

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right), & \text{Re} > 0; \\ \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) + \pi, & \text{Re} < 0, \text{Im} \geq 0; \\ \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) - \pi, & \text{Re} < 0, \text{Im} < 0; \\ \left(\frac{\pi}{2}\right) \text{sgn}(\text{Im}), & \text{Re} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

где  $\text{Im}$  – мнимая часть нормированного скалярного произведения;  $\text{Re}$  – действительная часть нормированного скалярного произведения.

Определение значения  $\theta$  для каждого объекта приоритетного списка позволяет проводить в автоматическом режиме поворот исходных изображений на угол максимального совпадения контуров исследуемого и тестового следа. Это значительно упрощает экспертизу визуальное сравнение следов в последующем.

Табл. 1. Максимальное значение модуля нормированного скалярного произведения контуров

Номер следа	1(1)	1(2)	5(1)	5(2)	4(1)	4(2)	6(1)	6(2)	39(1)	39(2)	21(1)	21(2)	31(1)	13(1)	47(1)
<b>1(1)</b>	<b>1</b>	<b>0.94</b>	0.80	0.81	0.58	0.55	0.82	0.80	0.79	0.77	0.45	0.50	0.56	0.74	0.56
<b>21(1)</b>	0.45	0.46	0.42	0.41	0.64	0.57	0.42	0.44	0.38	0.46	<b>1</b>	<b>0.76</b>	<b>0.81</b>	0.41	0.57
<b>39(1)</b>	0.79	0.79	0.79	0.78	0.55	0.54	0.82	0.77	<b>1</b>	<b>0.80</b>	0.38	0.42	0.52	0.70	0.57
<b>39(2)</b>	0.77	0.75	0.74	0.76	0.57	0.55	0.79	0.76	<b>0.80</b>	<b>1</b>	0.39	0.40	0.57	0.71	0.64
<b>5(1)</b>	0.80	0.82	<b>1</b>	<b>0.81</b>	0.58	0.62	0.80	0.82	0.79	0.77	0.42	0.43	0.55	0.74	0.56
<b>31(1)</b>	0.56	0.56	0.55	0.53	0.68	0.63	0.52	0.62	0.52	0.61	<b>0.81</b>	<b>0.78</b>	<b>1</b>	0.44	0.66
<b>31(2)</b>	0.53	0.50	0.41	0.45	0.69	0.60	0.41	0.53	0.42	0.50	0.80	0.77	<b>0.81</b>	0.42	0.57
<b>6(1)</b>	0.82	0.80	0.80	0.85	0.58	0.55	<b>1</b>	<b>0.84</b>	0.82	0.78	0.42	0.43	0.52	0.68	0.57
<b>6(2)</b>	0.80	0.82	0.82	0.82	0.59	0.61	<b>0.84</b>	<b>1</b>	0.77	0.78	0.44	0.47	0.62	0.67	0.64
<b>9(1)</b>	0.27	0.31	0.28	0.25	0.42	0.35	0.26	0.35	0.24	0.27	0.54	0.66	0.56	0.32	0.44
<b>13(2)</b>	0.65	0.66	0.64	0.65	0.57	0.59	0.63	0.64	0.65	0.63	0.44	0.50	0.47	<b>0.73</b>	0.55
<b>4(1)</b>	0.58	0.57	0.58	0.59	<b>1</b>	<b>0.72</b>	0.51	0.53	0.55	0.53	0.48	0.51	0.53	0.56	0.61
<b>47(2)</b>	0.50	0.49	0.50	0.53	0.59	0.52	0.51	0.58	0.50	0.52	0.56	0.58	0.62	0.48	<b>0.73</b>

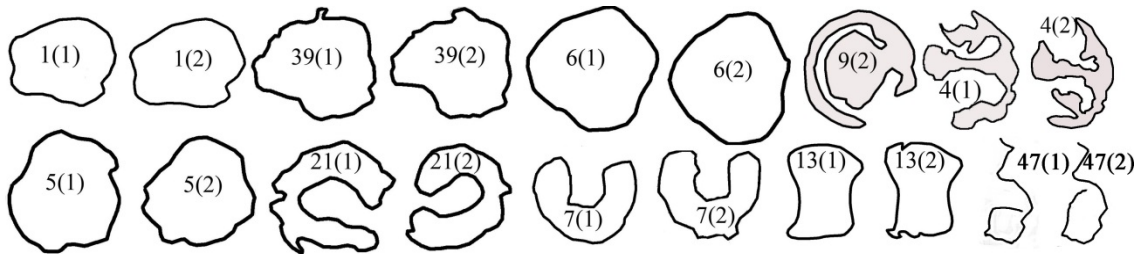


Рис. 8. Характерные формы контуров выделенных признаков

### 3. Прогнозирование и учет возможной вариативности признаков

Одной из серьезных проблем идентификации оружия является вариативность следов бойка. В отдельных случаях бинаризация изображений разных следов одного бойка приводит к выделению признаков с разными топологическими особенностями. Например, на одном изображении парного следа формируется два признака (Рис. 9 а), а на другом изображении следа этого же бойка – один признак (Рис. 9 б). Иногда на бинарных изображениях парных признаков на одном присутствует «озеро» (изолированная от фона область), а на другом на этом месте образовался «залив» - область, связанная с фоном (Рис. 10 а, б.). Такая топологическая вариативность приводит к формированию изображений парных контуров с разной конфигурацией. Топологические отличия признаков сравниваемых следов можно определить путем подсчета числа несвязанных между собой областей-признаков ( $I$ ) и характеристик

Эйлера ( $\chi$ ) изображений следов, представленных в бинарном виде:

$$\chi = I - L, \tag{8}$$

где  $L$  – число «озер» в признаках [9].

Изменение топологических характеристик ведет к существенным изменениям в первую очередь, таких дескрипторов, как площадь ( $S$ ) и периметр ( $P$ ). *Формирование изображений следов одного бойка с разными характеристиками Эйлера или разным числом признаков при одних и тех же режимах обработки исходных цифровых изображений будем понимать как топологическую вариативность признаков.*

Бинарное изображение следа, представленного на Рис. 9 а), имеет один признак, таким образом  $I=1, L=0$ , тогда характеристика Эйлера  $\chi=1$ . Изображение парного следа, представленного на Рис. 9 б),  $I=2$  (два несвязанных признака),  $L=0$  и  $\chi=2$ . На бинарном изображении, представленном на Рис. 10 а) внутри признака сформировалось «озеро», поэтому его топологические характеристики равны:  $I=1, L=1 \chi=0$ . На парном ему изображении (Рис. 10 б) на месте «озера» образовался «залив»:  $I=1, L=0, \chi=1$ .

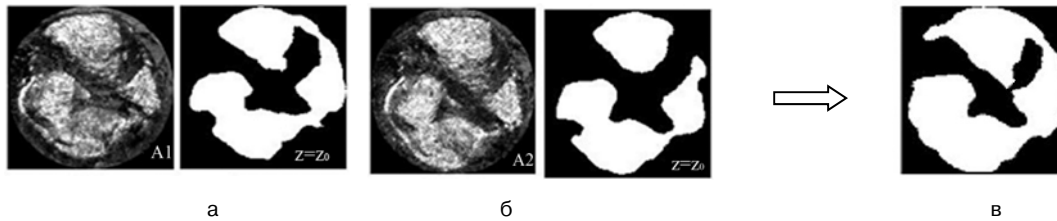


Рис. 9. Два следа одного бойка пистолета Беретта М 92

а – исходное тестовое изображение ( $A_1$ ) в градациях серого и его бинарное изображение, имеющее характеристику Эйлера  $\chi=1$ ; б – исходное исследуемое изображение ( $A_2$ ) в градациях серого и его бинарное изображение, имеющее характеристику Эйлера  $\chi=2$ ; в – результат бинаризации методом Ниблэка исходного исследуемого изображения  $A_2$  по уровню  $Z=Z_0-0.08$

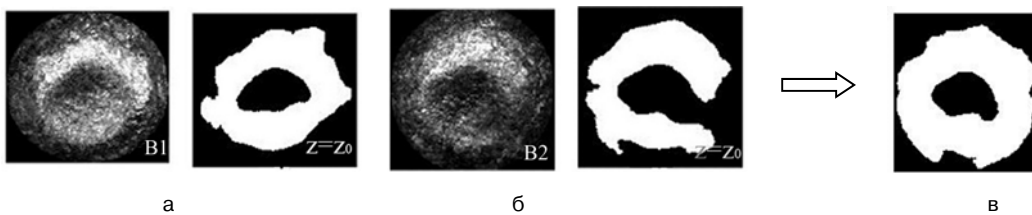


Рис. 10. Два следа одного бойка автомата Калашникова АК-74

а – исходное тестовое изображение ( $B_1$ ) в градациях серого и его бинарное изображение, имеющее характеристику Эйлера  $\chi=0$ ; б – исходное исследуемое изображение ( $B_2$ ) в градациях серого и его бинарное изображение, имеющее характеристику Эйлера  $\chi=1$ ; в – результат бинаризации исследуемого изображения  $B_2$  методом Ниблэка по уровню  $Z=Z_0-0.06$

Табл.2. Значения Max НСП

Max НСП ( $A_1, A_2$ )	Max НСП ( $A_1, A_2_{-0.08}$ )	Max НСП ( $A_1, A_2_{+0.08}$ )	Max НСП ( $B_1, B_2$ )	Max НСП ( $B_1, B_2_{-0.06}$ )	Max НСП ( $B_1, B_2_{+0.06}$ )
0.53	<b>0.78</b>	0.46	0.40	<b>0.76</b>	0.57

Контурные признаки парных следов на представленных бинарных изображениях не совпадают из-за разной их топологии.

Таким образом, если проведенный контурный анализ не позволил выявить парные следы из тестового массива, то нельзя исключить вероятность того, что такие следы имеются в базе данных, но бинарные изображения их признаков имеют топологию, отличающуюся от топологии признаков исследуемого следа.

Представленные примеры иллюстрируют актуальность прогнозирования вероятного изменения топологии признаков при бинаризации изображений. Бинаризация одних и тех же изображений при различных уровнях яркости показывает, что наибольшие изменения топологии признаков наблюдаются в областях с малым градиентом яркости (области с плавным изменением рельефа). Это соответствует и физическому смыслу: участки бойка с резким из-

менением рельефа более устойчиво отображаются в следах, чем участки со слабым изменением рельефа.

Оценить вероятную топологическую вариативность признаков можно путем изменения уровня бинаризации ( $Z_0$ ) на некотором интервале яркостей ( $\pm\Delta Z$ ), как в сторону повышения, так и понижения его значения. Например, уменьшение уровня бинаризации изображений, представленных на Рис. 9 а и Рис. 10 а), на величину  $-0.08$  и  $-0.06$  соответственно, позволило получить бинарные изображения признаков исследуемых следов топологически близкие к признакам парных следов (Рис. 9 б и Рис. 10 б). В Табл. 2 представлены результаты расчетов максимумов нормированного скалярного произведения контуров, получившихся в результате стандартной бинаризации представленных на Рис. 9 и Рис. 10 изображений исследуемых следов, а также после их бинаризации по изме-

ненному уровню. Видно, что максимум НСП для парных контуров при уровне бинаризации изображения исследуемого следа  $Z=Z_0-\Delta Z$  намного выше, чем при значениях  $Z=Z_0$  и  $Z=Z_0+\Delta Z$ .

При исследовании топологической вариативности исследуемого следа порог бинаризации необходимо изменять как в большую сторону, так и в меньшую с шагом  $\Delta h$ . При каждом изменении уровня бинаризации изображения программа вычисляет характеристики Эйлера  $\chi$  и число признаков  $I$  с площадью, например, более 600 пикселей. Если на каком-то шаге произошло изменение хотя бы одной из топологических характеристик исследуемого следа, то дальше проводится поиск по новым дескрипторам и по новой конфигурации контуров по ранее описанной методике. Расчеты показали, что достаточно проводить изменение уровня бинаризации на интервале  $\pm 0.08$  (при шкале яркостей от 0 до 1) с шагом  $\pm 0.01$ .

Топологическую вариативность признаков при работе с большими массивами изображений можно учитывать следующим образом. Сначала проводится поиск по описанной ранее методике. Если контурный анализ не позволил выявить «парные» следы, то изображение исследуемого следа бинаризуется методом Ниблэка по уровням  $Z_0 \pm n\Delta h$ , где  $n$  – порядковый номер шага изменения уровня бинаризации. В случае формирования при каком-то уровне бинаризации признаков с другой топологией (изменилась характеристика Эйлера  $\chi$  или изменилось число признаков  $I$ ), то проводится дополнительный анализ по новым значениям дескрипторов ( $S$ ,  $P$ ,  $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ) с последующим контурным анализом. Это позволит исключить пропуски изображений парных следов при их наличии в базе данных.

#### 4. Проведение проверок по следам, содержащим несколько признаков

Если исследуемый след содержит два признака и, соответственно, два контура, то кроме максимумов НСП сравниваемых контуров важной информацией является угол их разориентации. Одно значение  $\theta$  для обоих контуров одно-

го следа относительно контуров другого следа является дополнительным признаком того, что следы оставлены одним бойком.

Расчеты, проведенные со следами бойков, содержащих по два признака (при описании границ признаков 72 векторами), показали, что для парных изображений угол разориентации контуров признаков не превышает  $8^\circ$ .

Аналогичные рассуждения справедливы и для следов с большим числом признаков. Однако практика показывает, что малые по площади признаки можно исключить из рассмотрения из-за их высокой вариативности. Поэтому достаточно учитывать не более трех признаков с максимальной площадью. Расчеты, проведенные по следам с двумя и тремя признаками, показали высокую эффективность применения контурного анализа для корректного формирования приоритетного списка.

#### Заключение

1. Проведенные исследования показали перспективность применения предложенного алгоритма сравнения изображений следов с индивидуальными признаками в виде пятен произвольной формы, основанного на последовательном применении метода потенциальных функций и нормированного скалярного произведения контуров. Эффективность сравнения не зависит от ориентации изображений.

2. Предложенный метод может быть использован в качестве самостоятельного для проведения проверок по массиву цифровых изображений следов бойков, так и в качестве предварительного, например, для одного из корреляционных методов.

3. К недостаткам данного метода следует отнести слабую эффективность при анализе контуров по форме близких к окружности.

#### Литература

1. Theodore, V. Vorburger, James, H. Yen, B., Bachrach, Thomas, B. Renegar, Li Ma, Hyug-Gyo Rhee, Xiaoyu, A. Zheng, Jun-Feng, Song; Charles, D. Foreman, Surface topography analysis for a feasibility assessment of a National Ballistics Imaging Database, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). 2007.
2. Song J., Proposed “NIST Ballistics Identification System (NBIS)” Based on 3D Topography Measurements on Cor-



- relation Cells, AFTE Journal, Vol. 45, No. 2, Spring 2013, pp. 184-193.
3. Jie Zhou, Fanglin Chen, Jinwei Gu, A Novel Algorithm for Detecting Singular Points from Fingerprint Images, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Vol.31, No. 7, July 2009 pp. 1239 – 1250.
  4. Федоренко В. А., Корнилов М. В. Выделение индивидуальных признаков на цифровых изображениях следов бойков // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2014. Т. 14, вып. 1, ч. 2. С. 181-186.
  5. Rafael C. González, Richard Richard Eugene Woods, Steven L. Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB, published by Gatesmark Publishing, 2009. P. 826
  6. W. Niblack, An Introduction to Image Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986, pp. 115-116.
  7. Корнилов М. В., Федоренко В. А. Применение методов кластерного анализа для оценки схожести следов бойков // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2014. Т. 14, вып. 1, ч. 2. С. 187-190.
  8. Фурман Я.А. и др. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов// М. Физматлит. 2003. С. 25-32.
  9. Tom Leinster, The Euler characteristic of a category, Documenta Mathematica, Vol. 13, 2008, pp. 21–49.

**Федоренко Владимир Александрович.** Заведующий лабораторией Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского в 1981 году. Кандидат физико-математических наук, доцент. Автор более 80 печатных работ и 2-х монографий. Область научных интересов: судебная баллистика, идентификация оружия, обработка и сравнение цифровых изображений; распознавание изображений. E-mail: fed77@yandex.ru

**Корнилов Максим Вячеславович.** Инженер-программист Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского в 2011 году. Автор 18 печатных работ. Область научных интересов: анализ временных рядов, математическое моделирование биологических процессов, автоматическое распознавание изображений, компьютерное зрение. E-mail: kornilovmv@gmail.com