

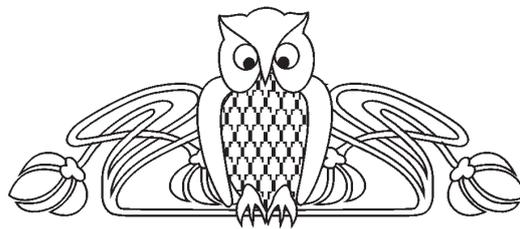


УДК 343.98.065

ОБРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЛЕДОВ НА ПУЛЯХ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОРУЖИЯ

В. А. Федоренко

кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией микроанализа и моделирования результатов
применения оружия, Образовательно-научный институт наноструктур
и биосистем Саратовского государственного университета
E-mail: fed77@yandex.ru



Е. В. Сидак

программист лаборатории микроанализа и моделирования результатов
применения оружия, Образовательно-научный институт наноструктур
и биосистем Саратовского государственного университета
E-mail: sidakev@gmail.com

Введение. Идентификация огнестрельного оружия по следам на выстреленных пулях является одной из наиболее сложных задач судебно-баллистической экспертизы. Это вызвано тем, что индивидуальные признаки оружия, отображающиеся в следах на выстреленных пулях, обладают высокой степенью вариативности. Применяемые в настоящее время способы автоматической идентификации огнестрельного оружия оказываются малоэффективными при анализе следов электронных пулек, содержащих десятки тысяч однотипных объектов. **Методы.** В работе предлагается алгоритм автоматической оценки схожести вторичных следов на выстреленных пулях, основанный на предварительной обработке изображений, их бинаризации и применении корреляционных методов. Для оценки идентификационной значимости следов используется автокорреляционная функция, а степень совпадения следов определяется по максимуму функции взаимной корреляции. Разработанный алгоритм фактически моделирует операции, которые умозрительно проводит эксперт при сравнении следов. Например, при сравнении следов методом совмещения трассы представляются в виде светлых полос относительно более темного фона независимо от яркости самого изображения. **Экспериментальная часть.** Работоспособность предлагаемого алгоритма протестирована на наборах пуль, выстреленных из 16 различных экземпляров оружия. Показана эффективность предложенного метода как при анализе парных следов, так и различающихся следов. **Обсуждение результатов.** Оценка идентификационной значимости следов и определение максимума функции взаимной корреляции цифровых изображений, представленных в бинарном виде, позволяет более корректно формировать приоритетный список по степени схожести сравниваемых изображений. В конечном счете это позволяет повысить эффективность проведения проверок по электронной пулетеке. **Ключевые слова:** следы на пулях, идентификация, сравнение признаков, индивидуальные признаки, автоматические баллистические идентификационные системы.

Введение

Возможность успешной идентификации оружия во многом обусловлена наличием микронеоднородностей на рабочих поверхностях слеодообразующих деталей (канал ствола и др.),

которые обеспечивают формирование на выстреленных пулях наборов трасс, индивидуализирующих конкретный экземпляр оружия. Современные баллистические системы позволяют оценить степень совпадения следов с помощью функции взаимной корреляции (ФВК), которая рассчитывается по исследуемым изображениям, представленным в градациях серого цвета. Критерием совпадения анализируемых следов считается наличие четко выраженного максимума ФВК вблизи нулевого сдвига. Однако в данном случае выраженность максимума зависит не только от количества совпадающих трасс, но и от их яркости и от средней яркости фона анализируемых изображений.

Кроме этого, в баллистических системах не предусмотрено исключение из цифровых изображений различных артефактов (потертостей, следов окисления и т.д.), которые могут присутствовать в сравниваемых следах. Все это снижает корректность формирования приоритетного списка, а в отдельных случаях может привести к пропуску парных следов (оставленных тем же экземпляром оружия, что и исследуемый след).

Методы

В работе рассматривается алгоритм оценки схожести вторичных следов на выстреленных пулях, включающий в себя: предварительную обработку изображений следов на основе применения фильтров, устраняющих мелкие вкрапления и артефакты, а также выравнивающих яркость изображений; предварительный анализ информационной значимости следов с помощью функции автокорреляции; анализ степени совпадения трасс на пулях на основе расчета функции взаимной корреляции изображений.



На первом этапе производится поворот трасс вторичного следа до строго вертикального положения с целью уменьшения ступенчатости и прерывистости тонких трасс, а также обеспечения одного угла их наклона. Здесь же оператор в ручном режиме выделяет области изображений с повреждениями и потертостями, а программа «заливает» их цветом фона.

Последующие этапы выполняются автоматически. На втором этапе проводится выравнивание освещения изображения и сглаживание пространственных шумов. С целью устранения влияния яркости фона на максимум функции взаимной корреляции исходные изображения бинаризируются – цвет всех трасс преобразуется в белый, цвет фона – в черный.

Следующим этапом алгоритма является оценка степени совпадения следов по бинарным изображениям с помощью ФВК [1]. Ниже каждый этап предлагаемого алгоритма описывается более детально.

Первый этап состоит в повороте трасс вторичного следа и исключении из дальнейшего анализа поврежденных участков изображений. Вторичный след, образованный полем нареза, представляет собой набор трасс, расположенных под некоторым углом к продольной оси пули (рис. 1, *а*). Изображения поворачиваются таким образом, чтобы трассы располагались строго вертикально (рис. 1, *б*). Далее из изображений удаляются крупные яркие артефакты и потертости, которые

могут возникать, например, за счет соударения пули с жесткой преградой или из-за окисления ее поверхности. Оператор при сканировании объектов помечает границы участков с дефектами, а программа, реализующая предлагаемый алгоритм, автоматически заменяет выделенную область цветом фона на данном участке изображения.

Второй этап предлагаемого алгоритма состоит из трех частей: выравнивания освещения изображений; сглаживания изображений и удаления шумов; бинаризации изображений и формирования штрих-кода. Выравнивание яркости изображений проводится с помощью фильтра «Размыкание» [2]. Данное морфологическое преобразование используется для компенсации перепадов фоновой яркости изображений в градациях серого цвета. Изображение после данного преобразования становится светлее и слегка размытым. На рис. 1, *в* показан результат применения фильтра «Размыкание» для изображения, представленного на рис. 1, *б*. Эффективность данного преобразования определяется используемой маской (матрицей), размерность и вид которой подбирались таким образом, чтобы изображение в результате преобразования имело равномерное освещение, а светлые трассы-признаки оставались четко выраженными относительно фона. В результате проведенных исследований был подобран оптимальный вид маски – матрица размером 5×5 , все элементы которой равны единице.

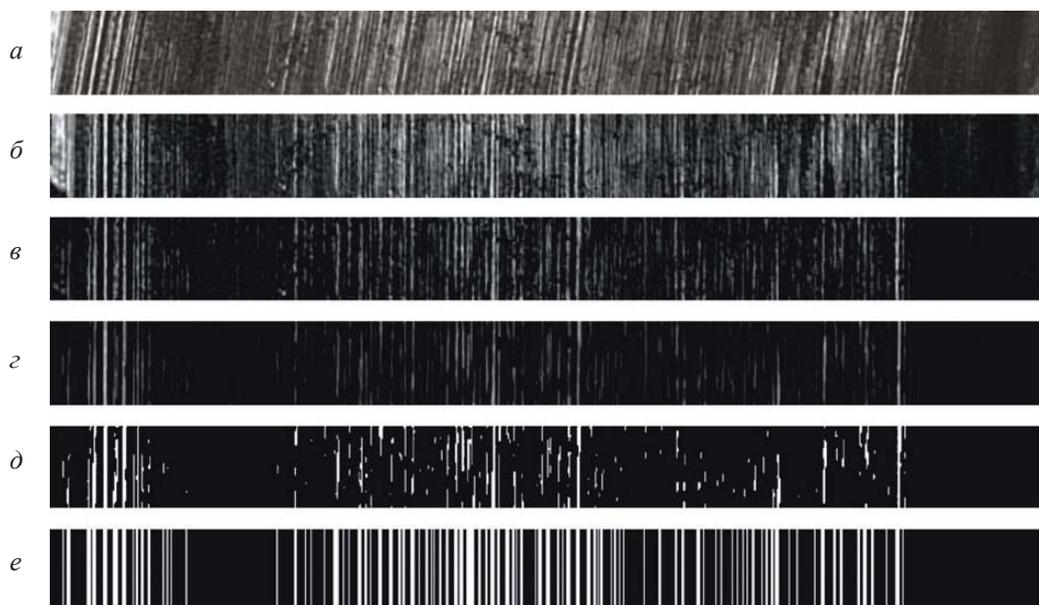


Рис. 1. Изображение вторичного следа после применения фильтров: *а* – исходное изображение; *б* – исходное изображение, повернутое на угол наклона трасс; *в* – изображение после применения фильтра «Размыкание»; *г* – изображение после применения фильтра «Эрозия»; *д* – исходное изображение в бинарном виде; *е* – бинарное изображение в виде штрих-кода



Второй частью этапа является сглаживание изображения и удаление шумов с помощью фильтра «Эрозия». В результате данного преобразования нежелательные мелкие вкрапления и шумы размывались, а более крупные участки изображения каким-либо значимым изменениям не подвергались. Структурообразующий элемент данного преобразования подбирался таким образом, чтобы в результате на изображении были удалены мелкие яркие вкрапления, но сохранены трассы. Расчеты показали, что такой маской может быть вектор-столбец размером не менее пяти элементов, состоящий из единиц. В результате применения преобразования «Эрозия» все элементы исходного изображения размером меньше маски оказывались затемненными цветом фона (рис. 1, з).

Следующей частью второго этапа предлагаемого алгоритма является бинаризация изображения и представление следа в виде штрих-кода. На рис. 2 представлена гистограмма типичного цифрового изображения следа на пуле. Видно, что гистограмма содержит в основном серые оттенки и фактически отсутствуют белые и черные пиксели. В результате абсолютный максимум функции взаимной корреляции, посчитанной по парным следам, не будет значительно превышать локальные максимумы, что осложняет формирование корректного приоритетного списка. Одним из путей усиления выраженности максимума ФВК является бинаризация изображений. В работе предлагается проводить бинаризацию предварительно обработанных изображений по глобальному порогу. Дополнительные исследования показали, что наиболее эффективным для выделения трасс оказывается выбор порога по медиане гистограммы яркостей изображения. Для пороговой бинаризации используется значение медианы, нормированное на количество оттенков серого цвета (256 в 8-битном коде).

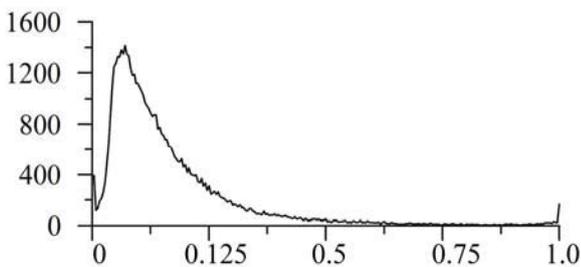


Рис. 2. Типичная гистограмма изображения вторичного следа на пуле, по оси абсцисс – нормированное значение яркости пикселей, по оси ординат – оценка плотности вероятности значения яркости пикселей

Например, медиана гистограммы изображения, показанного на рис. 1, б, с точностью до сотых равна 0,27. Результат применения бинаризации с указанным порогом показан на рис. 1, д. Видно, что на изображении оказались выделенными участки большинства трасс-признаков. Для улучшения восприятия белые области впоследствии методами морфологической обработки «вытягивались» до ширины исходного изображения (рис. 1, е), в результате чего изображение приобрело вид «штрих-кода».

Третьим этапом предлагаемого алгоритма является анализ тождественности «штрих-кодов» с предварительной оценкой их информационной значимости. Из общих соображений понятно, что след, представляющий собой последовательность часто идущих трасс с близким периодом, не обладает высокой идентификационной значимостью в соответствии с теорией судебной идентификации и его необходимо исключить из дальнейшего анализа. Следы с малым количеством трасс также не обладают высокой идентификационной значимостью. Для оценки идентификационной «уникальности» следа предлагается использовать автокорреляционную функцию, которая характеризует меру статистической зависимости значений пикселей, сдвинутых относительно друг друга на интервал времени τ :

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=0}^{N-\tau-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}), \quad (1)$$

где x – значения яркости пикселей одной выделенной строки матрицы анализируемого изображения, \bar{x} – среднее значение x , C_{xx} – автокорреляционная функция ряда x , N – длина строки, τ – сдвиг.

Функция C_{xx} , рассчитанная по изображению следа, представляющего собой уникальную последовательность трасс, по внешнему виду будет близка к δ -функции (функции Дирака). На рис. 3, а показан пример такого следа и соответствующей ему функции C_{xx} . Для сравнения на рис. 3, б показана автокорреляционная функция C_{xx} , рассчитанная по изображению малоинформативного следа, представляющего собой набор трасс с примерно одним периодом. Автокорреляционная функция такого следа, как видно из рисунка, качественно отличается от δ -функции.

Для автоматического анализа идентификационной значимости изображений следов необходимо ввести количественный критерий. В работе предлагается в качестве такого критерия использовать q – среднее значение модуля функции C_{xx} при сдвигах отличных от нуля:

$$q = \frac{1}{2m} \sum_{i=-m}^m |C_x(i)|, \quad i \neq 0. \quad (2)$$

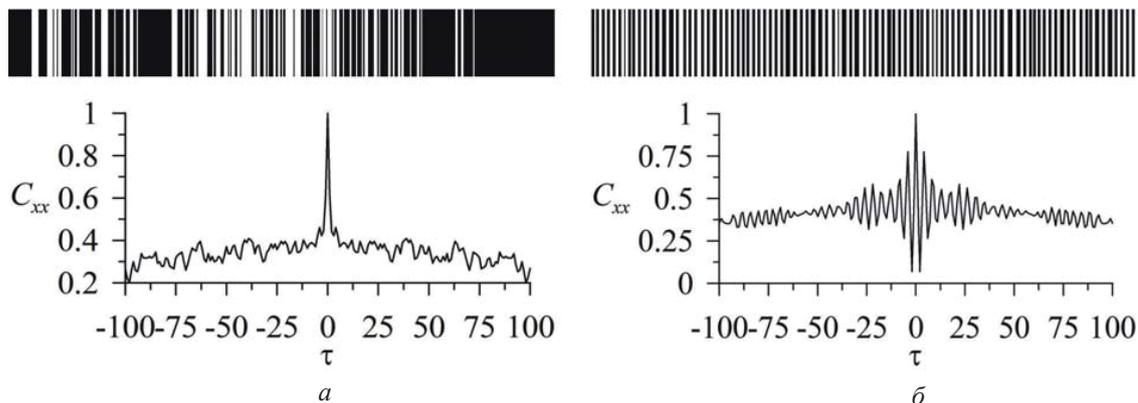


Рис. 3. Автокорреляционные функции: *a* – идентификационно значимый след и его автокорреляционная функция; *б* – малоинформативный след и его автокорреляционная функция

Если значение q не превышает 0,3 (т.е. среднее значение (q) в три раза меньше максимума нормированной автокорреляционной функции), анализируемый след предлагается считать пригодным для идентификации.

Тождественность следов определяется по положению и значению глобального максимума взаимной корреляционной функции, рассчитанной по бинарным изображениям. Функция взаимной корреляции имеет стандартный для дискретных сигналов вид:

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=0}^{N-\tau-1} (x_i - \bar{x})(y_{i+\tau} - \bar{y}), \quad (3)$$

здесь x , y – значения пикселей одной строки матрицы первого и второго изображения соответственно, N – длина строки (минимальная для анализируемых следов ширина изображения),

τ – сдвиг, \bar{x} – среднее значение x , \bar{y} – среднее значение y . Следует отметить, диапазон сдвига τ можно брать равным $0, 1N$, поскольку совпадения при больших сдвигах следов относительно друг друга не имеют физического смысла, что обусловлено механизмом образования вторичных следов при движении пули по нарезам канала ствола. На рис. 4, *б* показан график функции взаимной корреляции, посчитанной по бинарным изображениям «парных» следов, приведенных на рис. 4, *а*. Исходные изображения были получены с помощью баллистической идентификационной системы «POISC».

Четко выраженный максимум вблизи нулевого сдвига свидетельствует о высокой степени схожести анализируемых следов. Аналогичные значения ФВК были получены для абсолютного большинства других «парных» следов.

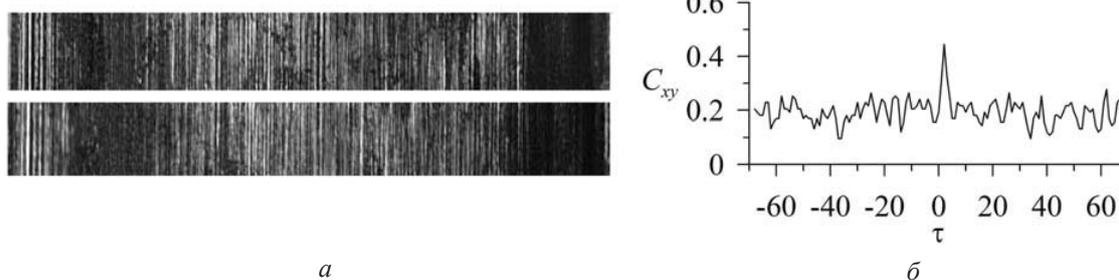


Рис. 4. Функция взаимной корреляции для парных следов: *a* – вторичные следы, образованные одним полем нареза; *б* – взаимная корреляционная функция, посчитанная по бинарным изображениям представленных следов

Экспериментальная часть

Работоспособность предлагаемого алгоритма была протестирована на наборах пуль, выстреленных из 16 различных экземпляров оружия. Цифровые изображения следов были получены с помощью стандартной автоматизированной баллистической идентификационной системы

«POISC». В базе данных имелось 70 цифровых изображений «парных» следов, обладающих идентификационной значимостью. В результате применения предложенного алгоритма был получен положительный вывод о тождестве для 31 пары из 35 совпадающих и отрицательный вывод для всех несовпадающих следов.



Анализ «парных» следов, по которым не был сформулирован вывод о тождестве, показал, что они обладают высокой вариативностью и достаточно сильно отличаются друг от друга, хотя при этом каждый из них имеет уникальный набор трасс. Данный результат поднимает вопрос о необходимости учета периодической устойчивости трасс, под которой понимается периодическое появление комплексов совпадающих трасс на разных пулях, выстреленных из одного экземпляра оружия. Например, на

рис. 5 представлены следы, сформированные одним и тем же участком дна нареза на выстреленных пулях. Видно, что на пулях, выстреленных по счету № 1, № 3, № 4 и № 7, трассы в следах выражены намного сильнее и они более многочисленны, чем на пулях, выстреленных из этого же экземпляра оружия по счету № 2, № 6, № 9 и № 11. В результате степень совпадения трасс на пулях первой группы (рис. 5, а) с трассами, представленными в следах на пулях второй группы (рис. 5, б), не будет высокой.

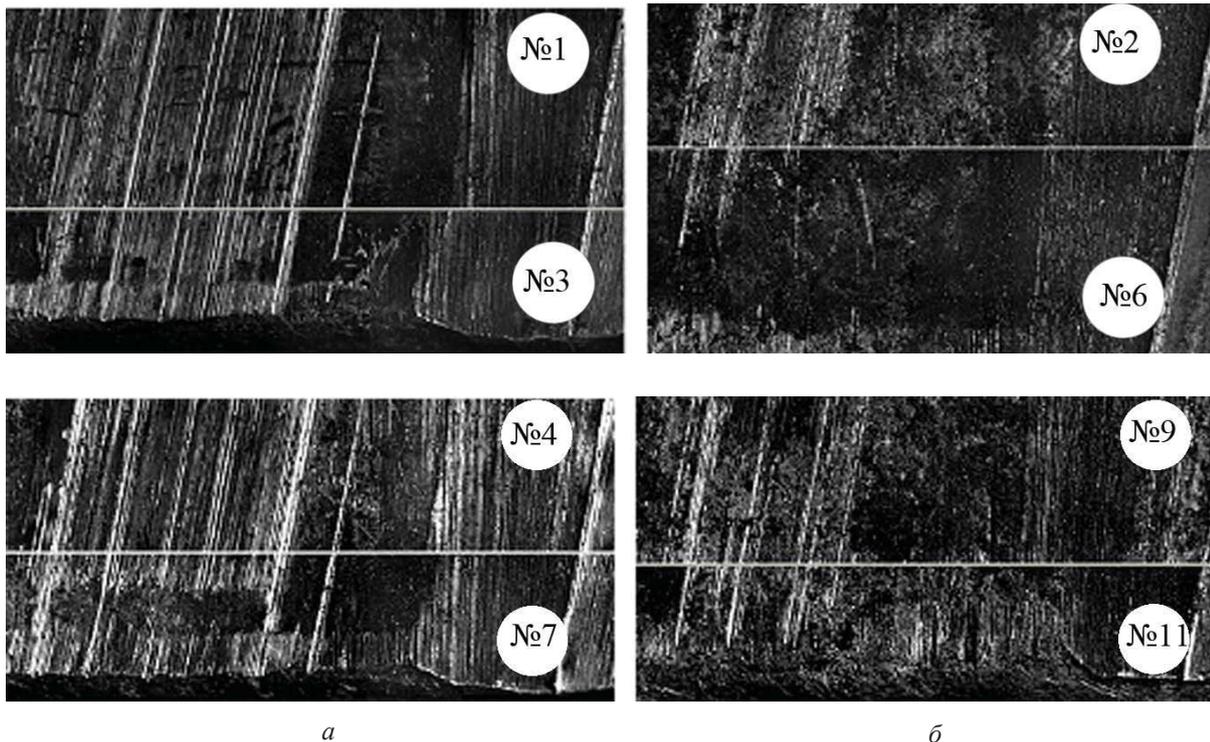


Рис. 5. Совмещения трасс в следах одного и того же нареза на пулях, выстреленных из одного экземпляра оружия, по счету: а – № 1 и № 3, № 4 и № 7; б – № 2 и № 6, № 9 и № 11

Обсуждение результатов

Эффективность разработанного алгоритма продемонстрирована на массиве из 70 пригодных к идентификации изображений, полученных путем сканирования 32 пуль, выстреленных из 16 экземпляров оружия. Предложенный алгоритм позволяет исключить из окончательных расчетов следы с малой идентификационной значимостью. Расчеты показали эффективность работы данного алгоритма и его перспективность для применения в автоматизированных баллистических идентификационных системах.

Однако следует отметить, что остался нерешенным вопрос учета вариативности следов. Так, анализ уникальности каждого следа, например по виду автокорреляционной функции,

является необходимым условием для обеспечения идентификации оружия в автоматическом режиме, но недостаточным. Проблема заключается в вариативности отображения одних и тех же трасс на разных пулях, выстреленных из одного экземпляра оружия. Например, уникальный набор трасс одного парного следа может частично не совпадать с уникальным набором трасс парного ему следа на другой пуле. Таким образом, при наличии в пулетеке нескольких (более двух) пуль, выстреленных из одного канала ствола, следует учитывать повторяемость (устойчивость) одних и тех же трасс в парных следах. Однако эта проблема выходит за рамки данной работы и требует проведения достаточно серьезных и трудоемких дополнительных экспериментальных исследований.



Выводы

Алгоритм хорошо зарекомендовал себя при автоматической обработке изображений вторичных следов на пулях, что делает его перспективным инструментом для анализа больших массивов данных.

Исходные изображения следует бинаризовать для устранения влияния яркости фона на результат оценки схожести следов путем расчета функции взаимной корреляции.

Необходимым и достаточным условием обеспечения процесса идентификации оружия в

автоматическом режиме является близость АКФ сравниваемых следов к дельта-функции, а также учет устойчивости трасс в следах.

Список литературы:

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М. : Мир, 1974. 198 с.
2. Гансалес Р., Вудс Р. Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа. М. : Техносфера, 2005. 1072 с.

Processing of Digital Images of Traces on Bullets for Automatic Identification of Firearms

V. A. Fedorenko

Education Research Institute of Nanostructures and Biosystems
of the Saratov State University,
83, Astrakhanskaya, Saratov, 410012, Russia
E-mail: fed77@yandex.ru

E. V. Sidak

Education Research Institute of Nanostructures and Biosystems
of the Saratov State University,
83, Astrakhanskaya, Saratov, 410012, Russia

Introduction. Identification of firearms by traces on the shot bullets is one of the most difficult tasks in the forensic ballistic examination. This is because the individual characteristics of weapons that appear on shot bullets have a high degree of variability. The currently used methods of automatic identification of firearms are ineffective when analysis is carried out on electronic bullet repository which includes tens of thousands of similar objects. **Methods.** In this paper we present the algorithm of automatic assessment of similarity of the secondary traces on shot bullets. The algorithm is based on the preliminary image processing, their binarization and application of correlation methods. For the evaluation of the identification significance of traces we use autocorrelation function, and the degree of coincidence of traces is determined by the maximum of the cross-correlation function. The developed algorithm actually simulates the operations, which expert performs during comparing of traces. For example, expert visualizes a striae as a light bands on the dark background, regardless of the brightness of the image itself. **Experimental part.** The efficiency of the proposed algorithm is tested on a set of bullets, shot from 11 different weapons. Efficiency of the proposed method has been shown, both in the analysis of paired and distinct traces. **Discussion of the results.** Assessment of the identification significance of traces and determination of the maximum of the cross-correlation function of digital images presented in a binary form, allows more correctly form the priority list according to the degree of similarity of the images which will be compared. Ultimately, this improves the efficiency of inspections by electronic bullet repository.

Key words: marks left on bullets, identification, comparison of attributes, an individual attributes, automated ballistic identification systems.

References

1. Box G. E. P., Jenkins G. M. *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco, Holden-DayBoks, 1970. 575 p. (Russ. ed.: Boks Dzh., Dzenkins G. *Analiz vremennykh riadov. Prognoz i upravlenie*. Moscow, Mir Publ., 1974. 198 p.).
2. Gonzales Rafael C., Woods Richard E. *Digital Image Processing*. 2nd ed. New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002 (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. *Mir Tsifrovoi obrabotki. Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p.).