

# Анализ следов на выстреленных пулях методами конгруэнтно совпадающих сегментов профилей и k-ближайших соседей

В. А. Федоренко<sup>1</sup>, К. О. Сорокина<sup>2</sup>, П. В. Гиверц<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

<sup>3</sup>Баллистическая лаборатория полиции Израиля, Иерусалим, Израиль

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема классификации сравниваемых изображений следов полей нарезов на выстреленных пулях по категориям «совпадающие» и «несовпадающие». Целью работы является повышение эффективности сравнения изображений следов методом конгруэнтно совпадающих сегментов следов (СМПС). Научная новизна заключается в учете дополнительного независимого признака и применении на конечном этапе анализа следов метода k-ближайших соседей. В результате проведенных исследований установлено, что точность классификации анализируемых пар изображений предложенным комбинированным методом порядка 87%. Показано, что анализ следов СМПС методом позволяет эффективно сравнивать изображения следов с высоким разрешением (порядка 1 мкм на пиксель). Работа представляет интерес для разработчиков программного обеспечения автоматизированных баллистических идентификационных систем.

**Ключевые слова:** метод конгруэнтно совпадающих сегментов профилей; вторичные следы; корреляция; классификация; метод k-ближайших соседей.

DOI 10.14357/20718632210108

## Введение

При прохождении пулей канала нарезного ствола, поля нарезов формируют на ее поверхности наклонные динамические следы (так называемые вторичные следы), состоящие из наборов параллельно расположенных трасс [1]. Более 100 лет идентификация оружия по таким следам проводится по устоявшейся методике совмещения разверток динамических следов. Сравнивая следы методом их максимального совмещения, эксперты по огнестрельному оружию, опираясь на личный опыт и внутреннее убеждение определяют, были ли исследуемые две пули выстрелены из одного ствола (одного экземпляра оружия). Чем больше трасс совмес-

тилось, тем более обоснованным считается вывод о едином следообразующем объекте, сформировавшем данные следы. Крайне сложно задача идентификации оружия решается при исследовании деформированных пуль. При этом на основании опыта авторов можно констатировать, что порядка 40% - 60 % пуль, изымаемых с мест преступлений, являются деформированными. В целом, выводы по результатам таких идентификационных исследований содержат достаточно большую субъективную составляющую, что обусловлено отсутствием объективных количественных критериев оценки схожести совмещенных следов [2].

В работе [3] предпринята попытка введения объективных критериев оценки вероятности

случайного совмещения наборов трасс в сравнимых вторичных следах. Предложенная модель позволяет учитывать как общее число совпадающих трасс, так и серии последовательно совпадающих трасс. Однако предложенная концепция оценки уникальности совпадающих комплексов трасс не позволяет анализировать следы на деформированных пулях. В статье [4] предложено оценить вероятность наилучшего совмещения всех пар вторичных следов на исследуемых пулях, а затем определить среднее значение от этих величин. В идеале, средние значения вероятностей для пуль, выстреленных из одного и из разных нарежных стволов должны разделяться. Однако на практике это не всегда наблюдается. Достаточно часто следы на пулях, выстреленных из одного ствола, имеют малое число совпадающих признаков. В результате среднее значение вероятности для таких следов будет таким же, как и для следов на пулях, выстреленных из разных экземпляров оружия.

Попытки разработки математической модели эффективного сравнения следов на выстреленных пулях на основе нейронных сетей были предприняты ранее рядом авторов. Например, в 2004 г. была опубликована одна из первых работ по проведению поиска по базе данных бинарных изображений следов на выстреленных пулях с помощью полносвязанной нейронной сети [5], имеющей 96 входных нейронов. Однако нейронная сеть с такой архитектурой не является оптимальной для решения подобных задач, особенно с учетом возможной деформации пуль. В работе [6] описано применение сверточной нейронной сети для определения модели оружия по групповым признакам следов на выстреленных пулях. Следует отметить, групповые признаки оружия, отобразившиеся в следах на пулях, выстреленных из исследуемых в данной работе моделей оружия, достаточно сильно различаются, что существенно облегчает задачу их классификации. Кроме того в данной работе также не исследовались следы на деформированных пулях.

В работе [7] предпринята попытка компенсации искажений изображений следов на деформированных пулях. Однако данный метод является достаточно сложным в реализации,

требует проведения точных измерений деформаций и для работы с большими базами данных фактически не пригоден.

В целом можно отметить, что стандартной методикой автоматического сравнения изображений вторичных следов, сформированных полями нарезов, является построение функции их взаимной корреляции (ФВК). Чем выше максимальное значение ФВК, тем выше схожесть следов. Однако из-за вариативности следов величина максимума ФВК не всегда однозначно связана с их схожестью. Обусловлено это несколькими основными причинами.

Во-первых, во вторичных следах сформированных одним полем нареза, даже на недеформированных пулях обычно совмещается не более 60% трасс. При этом могут формироваться следы с малым числом трасс, например, на пулях, выстреленных из автомата Калашникова кал. 5.45 мм (АК-74) [8].

Во-вторых, в результате столкновения пули с достаточно жесткой преградой она деформируется, что приводит к искажению следовой картины на ее поверхности. Даже небольшая деформация одной пули относительно другой может привести к существенному расхождению совпадающих трасс, ширина которых лежит в среднем от 4 мкм до 10 мкм. На Рис. 1 а, б представлено совмещение следов, сформированных одним полем нареза (совпадающих следов). Сплошной белой линией помечены группы совмещенных трасс, а прерывистой черной линией – комплексы совпадающих, но «разбежавшихся» трасс. Видно, что совмещение трасс в одной группе приводит к расхождению совпадающих трасс во второй группе и наоборот. Следует отметить, что деформация может быть нелинейной, поэтому масштабирование длины изображения одного следа не всегда приводит к совмещению всех совпадающих трасс. В данном случае под понятием «совпадающие трассы» подразумеваются трассы, образованные одними и теми же неоднородностями поверхности одного поля нареза.

В-третьих, при покадровом сканировании поверхности пуль при формировании цифрового изображения следа кадры не всегда идеально сшиваются. В результате на каждой шивке может быть потеряно или наоборот продубли-

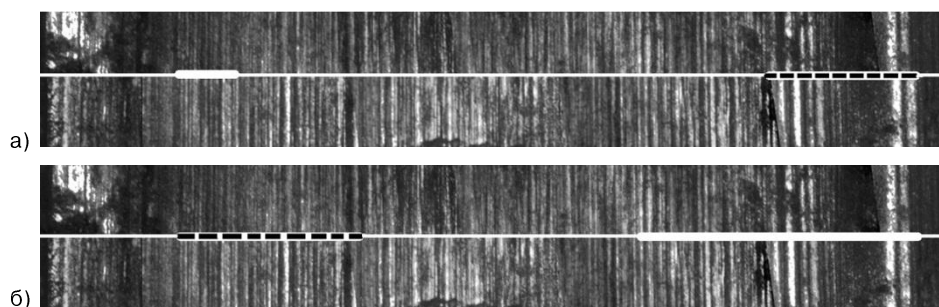


Рис. 1. Совпадающие следы одного поля нареза на пулях с разной деформацией

ровано 1-2 столбца пикселей. Ширина кадров обычно порядка 0.6 мм и на формирование изображения вторичного следа (длина следов для различных моделей оружия лежит в достаточно широком диапазоне) потребуется от 3 до 5 кадров. В данной работе исследовались следы, характерные для пистолета Макарова шириной 2.3-2.4 мм. При стандартном разрешении баллистических сканеров 3-4 мкм на пиксель [9, 10], за счет неудачной сшивки кадров след может растянуться или сузиться на 10-20 мкм. В результате совпадающие трассы могут существенно разойтись на краях совмещенных следов (Рис. 1, б).

## 1. Метод конгруэнтно совпадающих сегментов следов

Для оценки схожести вторичных следов на деформированных пулях и отнесения их к категории «совпадающие» или «несовпадающие» в работах [11, 12] был предложен оригинальный метод, названный методом конгруэнтно совпадающих сегментов профилей следов (кратко - CMPS метод). Суть данного метода заключается в следующем.

Из двух изображений сравниваемых следов один след (будем называть его исследуемым) разбивается на равные по длине не перекрывающиеся сегменты (обычно на 20 - 25). На изображении исследуемого следа выявляются сегменты не пригодные для корреляционного анализа и исключаются из дальнейшего анализа. Под непригодными сегментами понимают области следа не содержащие трасс, области засветки и т.п. Затем последовательно для каждого пригодного к корреляции сегмента исследуемого следа и полного изображения второго следа строится функция взаимной корреляции

(ФВК). Поскольку исследуемый след разбит на достаточно короткие сегменты, то значимого накопления сдвига совпадающих трасс за счет разной длины анализируемых следов не произойдет. В идеале для совпадающих следов для каждого сегмента максимум функции взаимной корреляции будет наблюдаться в точке его максимального совмещения с соответствующим сегментом тестового следа (Рис. 2, а) [11]). Если все ФВК расположить одна под другой в соответствии с их очередностью и сдвинуть (кроме первой) на величину сегмента влево относительно предыдущей (верхней, Рис. 2 б), то локальные максимумы ФВК с наибольшим значением (отмечены сверху черными точками) выстроятся вдоль широкой вертикальной линии серого цвета. Такую конфигурацию расположения максимумов ФВК с наибольшим значением предложено называть условием конгруэнтного положения максимумов. Чем на большем числе сегментов будут присутствовать максимумы ФВК, удовлетворяющие условию конгруэнтности, тем выше подобие сопоставляемых следов. В зависимости от числа конгруэнтно совпадающих максимумов предлагается классифицировать анализируемые пары следов по категориям «совпадающие» и «несовпадающие».

В отдельных случаях из-за вариативности следов при совмещении совпадающих фрагментов следов может наблюдаться локальный максимум не с самым высоким значением. Поэтому авторы CMPS методики для каждого сегмента учитывали по 5 максимумов с наибольшим значением ФВК. Если расположение хотя бы одного из них (максимума) удовлетворяло условию конгруэнтности, то считалось, что на тестовом следе присутствует схожий для данного сегмента фрагмент. На Рис. 2, б на

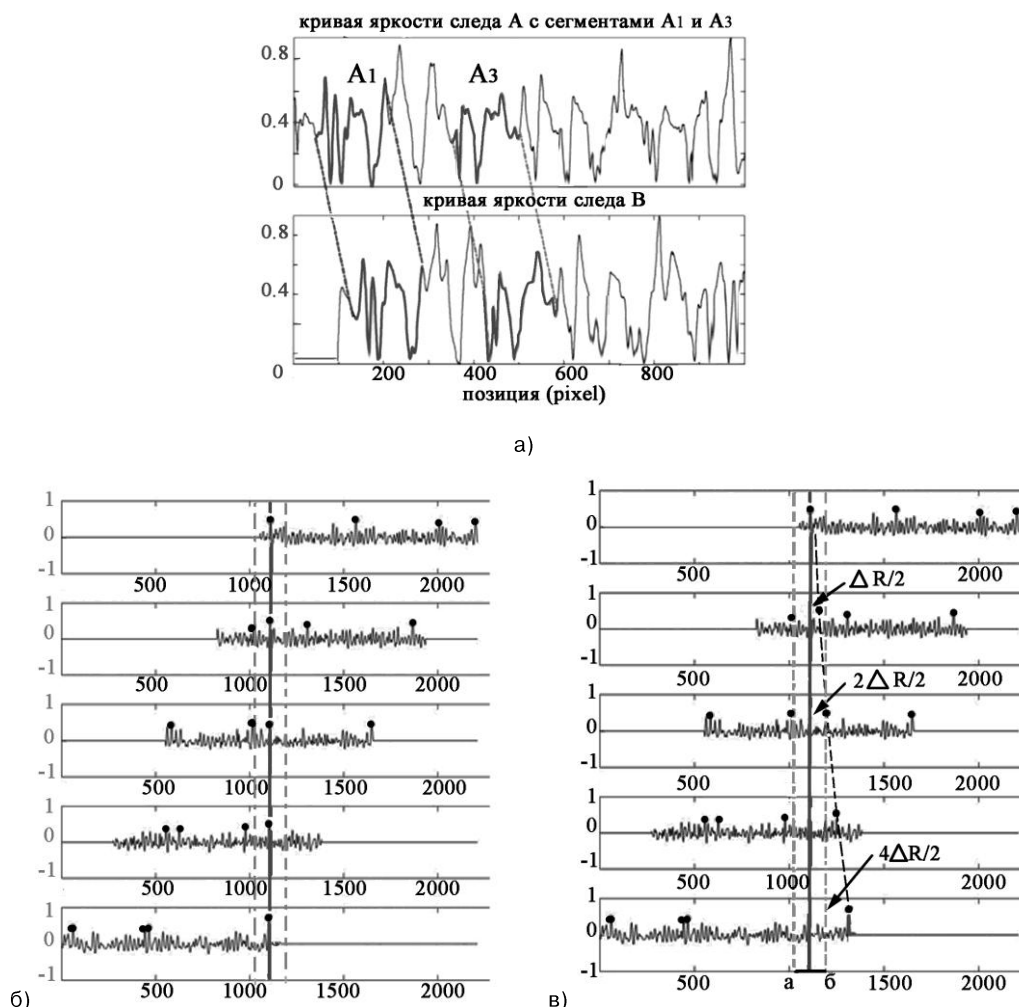


Рис. 2. Метод конгруэнтно совпадающих сегментов профилей следов

а) - совпадающие сегменты профилей двух следов; б) - максимумы ФВК для каждого сегмента для недеформированных пуль, удовлетворяющие условию конгруэнтности; в) - возможное смещение максимумов ФВК для совпадающих областей сравниваемых следов при большой деформации одной пули относительно другой.

ФВК каждого сегмента выделено по 4 наибольших максимума, отмеченных черными точками. Максимумы, удовлетворяющие условию конгруэнтности, выстроились вдоль широкой вертикальной линии.

Если совпадающие следы имеют одну длину (пули не деформированы), то максимумы ФВК для совпадающих сегментов профилей следов выстроятся вдоль вертикальной линии (Рис. 2 б). За условие конгруэнтности, определяющее интервал, в пределах которого следует учитывать максимумы, можно принять длину сегмента (интервал [а-б] на Рис. 2, в). Относительная деформация одной пули относительно другой не более 10% удовлетворяет данному условию

конгруэнтности. При равномерной деформации одной из пуль и при сдвигах ФВК строго на ширину сегмента, максимумы соответствующие совпадающим областям следов будут сдвигаться влево или вправо относительно вертикальной линии (Рис. 2, в) в зависимости от того, какой след будет длиннее. Если деформация достаточно большая, а ширина сегментов маленькая, то интересующие нас максимумы ФВК могут выйти за пределы ширины сегмента, обозначенного на Рис. 2, в) как интервал [а-б]. Поэтому для пуль с сильной деформацией смещение максимумов необходимо будет учитывать и ФВК сдвигать в соответствии с формулой (1):

$$\Delta L = (i - 1) * L_{sl} \pm (i - 1) * \frac{\Delta R}{2} = \\ = (i - 1) * (L_{sl} \pm \frac{\Delta R}{2}) \quad (1)$$

где  $\Delta R$  – разница в длине сравниваемых следов;  $M$  – число сегментов;  $i$  – порядковый номер сегмента ( $i=1, \dots, M$ );  $L_{sl}$  – длина одного сегмента; второе слагаемое в правой части уравнения (1) (дополнительное смещение) берется со знаком +, если исследуемый след короче тестового и со знаком -, если исследуемый след длиннее тестового.

Следует отметить, что чрезмерное расширение непосредственно интервала конгруэнтности не выгодно, поскольку в него случайным образом будет попадать много максимумов ФВК. Поэтому для сильно деформированных пуль более корректно сдвигать ФВК в соответствии с формулой (1). При определении оптимального числа разбиений необходимо учитывать одно достаточно очевидное обстоятельство: чем меньше трасс (плотность трасс) в следе, тем на меньшее число сегментов его следует разбивать. Например, во вторичных следах на пулях, выстреленных из пистолета Макарова, Стечкина, ИЖ-79 и т.д., число трасс в следах может достигать 80-90. В следах на пулях, выстреленных из АКМ, обычно присутствует в среднем от 10 до 30 трасс, а на пулях выстреленных из АК-74 их число редко превышает 10 (Рис. 3, а и б). Поэтому следы на пулях выстреленных из различных моделей автомата Калашникова следует разбивать на малое число

сегментов, например, на пять, а следы на пулях, выстреленных из пистолета Макарова можно разбить на 15-20 сегментов.

## 2. Предварительная обработка изображений

Для проведения исследований были получены наборы пар изображений совпадающих и несовпадающих следов с неравномерным искажением вдоль горизонтальной оси. Искажения были обусловлены как деформацией пуль, так и некорректной сшивкой кадров при формировании полных изображений вторичных следов. Цифровые изображения следов с пространственным разрешением порядка 3.5 мкм были получены путем сканирования исследуемых пуль с помощью автоматизированной баллистической идентификационной системы (АБИС) «POISC» [10]. Изображения следов формировались одной размерности по горизонтальной оси (720 пикселей) с одним пространственным разрешением.

Цифровые изображения следов подвергались предварительной обработке, включающей следующие операции:

1. Исследуемые и тестовые следы формировались одной размерности по горизонтальной оси (720 пикселей) и с одним пространственным разрешением 3.5 мкм на пиксель (Рис. 4, а).

2. Исходные изображения поворачивались на угол наклона нарезов так, чтобы трассы во вторичных следах стали вертикальными (Рис. 4, б).

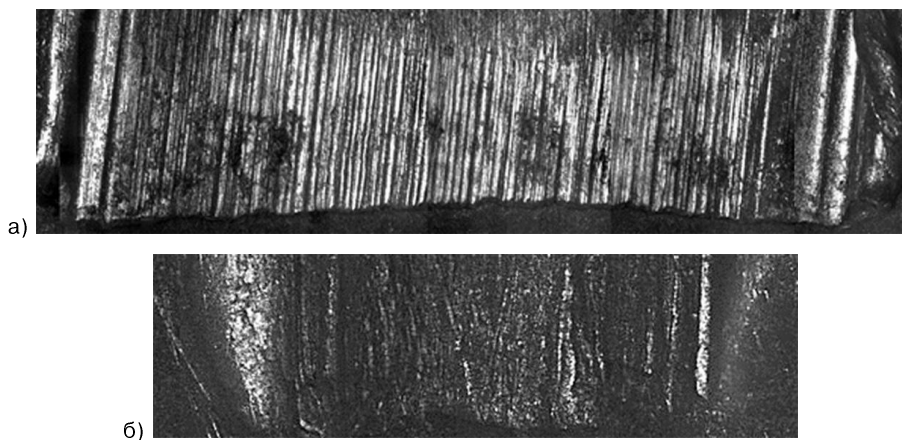


Рис. 3. Распределение трасс во вторичных следах, характерное для пуль, выстреленных из а) – пистолета Макарова; б) – АК-74

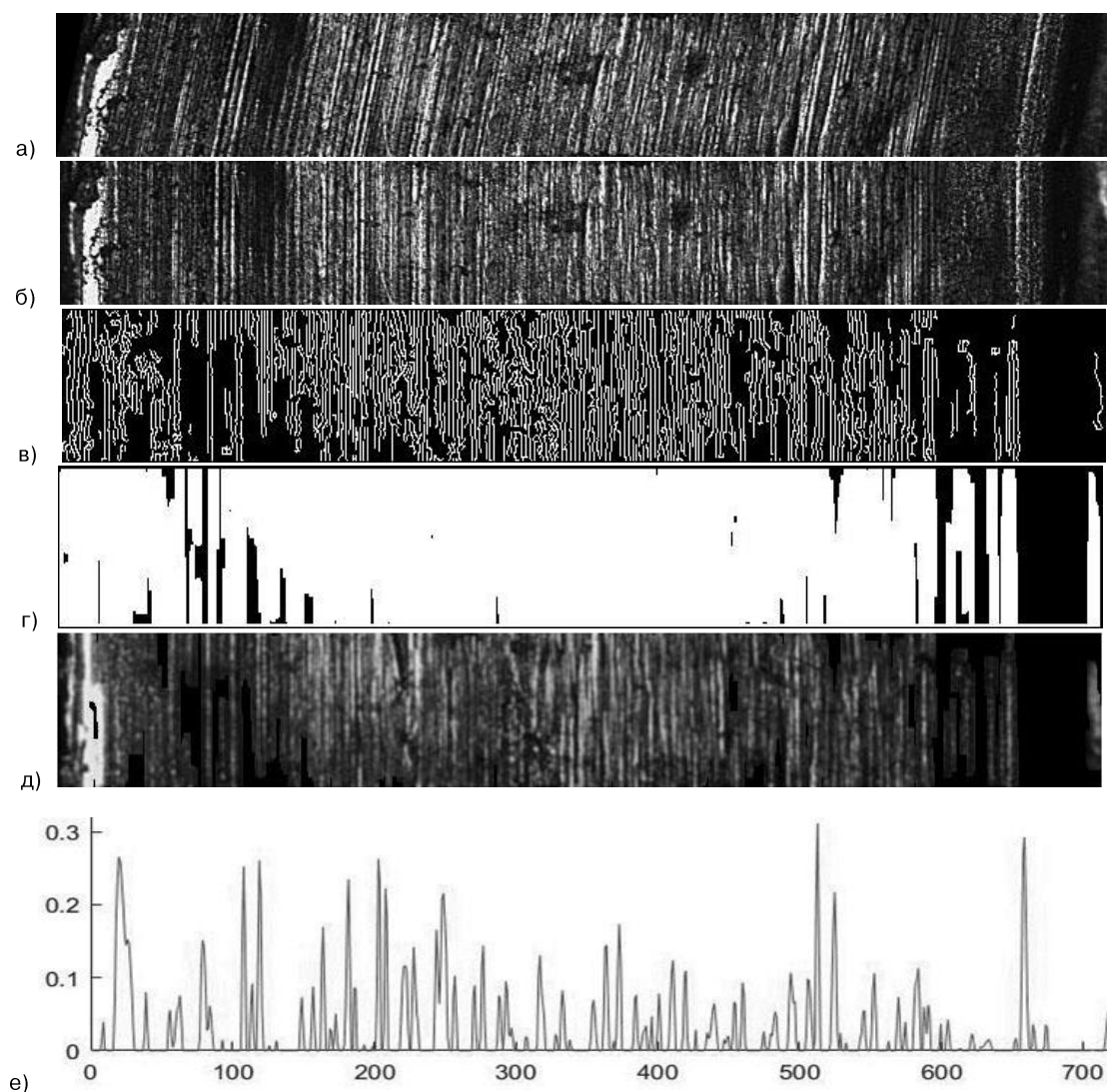


Рис. 4. Предварительная обработка изображений вторичных следов

а) – исходное изображение следа; б) – след с повернутыми трассами; в) – выделенные контуры трасс; г) – выделенные белым цветом области следа, пригодные к корреляции; д) – след с выделенными областями, пригодными к корреляции; е) – профиль следа по яркости

3. С помощью детектора границ Канни (Canny Edge Detection) [13] были выделены трассы в виде вертикальных линий (Рис. 4, в). В принципе, для этой цели можно использовать другие фильтры выделения линий и контуров.

4. Получившиеся на предыдущем этапе линии подвергались операции дилатации (расширения) [13] с помощью маски  $25 \times 5$ , в результате чего для каждого следа были выделены области белого цвета (яркость пикселей равна 1) пригодные к корреляции. Остальные участки имели нулевую яркость (Рис. 4, г).

5. Для выделения только пригодных областей бинарное изображение, полученное на предыдущем этапе, поэлементно перемножалось с исходным изображением. В результате данной операции было сформировано третье изображение с такой же размерностью, как и исходное. В нем пригодные к сравнению области обладали исходной яркостью, а непригодные для корреляции области имели нулевую яркость (Рис. 4, д).

6. Затем рассчитывалась средняя яркость изображения по столбцам и строилась кривая яркости. Для удаления низкочастотных яркостных

засветок и выделения яркостных пиков к кривой яркости применялась высокочастотная (ВЧ) фильтрация. Для удаления ВЧ пространственных шумов применялось сглаживание кривой линейным фильтром  $1 \times 5$  пикселей (Рис. 4, е).

Последняя операция завершает этап предварительной обработки цифровых изображений вторичных следов.

### 3. Расчеты методом CMPS

При проведении расчетов интервал, на котором подсчитывалось число максимумов, удовлетворяющих условию конгруэнтности, был выбран равным длине сегмента (48 пикселей). Такая длина интервала гарантировала попадание в него максимума ФВК при совпадении признаков на сопоставляемых сегментах следов независимо от того, какая пуля имела большую деформацию (относительная разность диаметров анализируемых пуль не превышала 10%). Предварительные расчеты, проведенные по нескольким парам следов, показали, что оптимальным является разбиение на 15 сегментов. Деление на 20 или 25 сегментов ведет к чрезмерному сокращению в них признаков и, как следствие, к формированию необоснованно большого числа максимумов. При разбиении на 10 или меньшее число фрагментов усиливается негативное влияние деформации пуль на функцию корреляции. Пригодными к корреляционному анализу сегментами исследуемого изображения считались те, у которых более 50% пикселей было отлично от нуля.

Блок-схема алгоритма расчета функции взаимной корреляции по сегментам и положений 4-х максимальных значений ФВК для каждого сегмента представлена на Рис. 5. К основным блокам алгоритма можно отнести: блок предварительной обработки изображений; блок

подсчета числа трасс в каждом следе (по числу пиков на кривой яркости); блок оценки пригодности сегментов; блок расчета ФВК по сегментам; блок определения количества конгруэнтных максимумов.

Блок предварительной обработки изображений на выходе выдает кривую средней по столбцам яркости (Рис. 4, е).

Оценка числа трасс в каждом следе производилась путем подсчета числа максимумов на кривой яркости изображений как исследуемого, так и тестового вторичного следа. На выходе блока подсчета трасс выдается их число как в исследуемом, так и тестовом следах  $N_1$  и  $N_2$ . За  $N_1$  принимается меньшее значение числа трасс независимо от следа.

Блок оценки пригодности сегментов дает на выходе число пригодных к корреляции сегментов  $S_{val}$  и набор этих сегментов. Расчет ФВК производится по отдельности для каждого сегмента. Результатом работы данного блока является набор ФВК для каждого пригодного к корреляции сегмента с выделенным числом максимумов ФВК с наибольшим значением (Рис. 2, б).

Финальная часть алгоритма - подсчет количества конгруэнтных максимумов. С этой целью производится подсчет выделенных максимумов, попадающих в интервал, удовлетворяющий условию конгруэнтности. В конечном счете, на выходе программа выдает следующие данные:  $S_{max}$  - число ФВК, на которых положение хотя бы одного из четырех наибольших максимумов удовлетворяет условию пространственной конгруэнтности;  $S_{val}$  - число сегментов, пригодных к корреляции и отношение  $S_{max}/S_{val}$ ;  $N_1, N_2$  - число трасс в анализируемых следах, при этом за  $N_1$  принимается меньшее число трасс независимо от того, к какому из сопоставляемых следов это относится;  $L=N_1/N_2$  - коэффициент схожести следов по числу трасс.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета ФВК CMPS методом

#### 4. Обучение алгоритма метода $k$ -ближайших соседей

Для повышения эффективности прогнозирования категории исследуемых пар следов был выбран метод  $k$ -ближайших соседей. Обучающая выборка включала 42 пары изображений заведомо совпадающих и 58 пар заведомо несовпадающих вторичных следов. Тестовая выборка представляла собой 20 пар изображений совпадающих следов и 20 пар несовпадающих следов. В качестве объясняющих признаков были выбраны значения  $S_{max}$ ,  $S_{max}/S_{val}$ ,  $L=N_1/N_2$ , рассчитанные на предыдущем этапе CMPS методом. В качестве зависимого признака выбраны категории анализируемых следов: «совпадающие следы»; «несовпадающие следы». Объекты обучающей выборки представлены в 3-х мерном пространстве признаков (Рис. 6). Для прогнозирования категории анализируемых пар объектов использовался кросс-валидационный (*Cross-validation*) метод  $k$ -ближайших соседей [14, 15]. Для его обучения была разработана программа в среде Matlab, которая проводит перекрестную проверку для определения оптимального значе-

ния  $k$ , при котором наблюдается наименьшая ошибка (наибольшая точность) прогнозирования категории сопоставляемых объектов. С этой целью матрица признаков объектов обучающей выборки в произвольном порядке разбивалась на 5 отдельных массивов. Один из массивов признавался валидационной выборкой, остальные составляли тренировочную часть. Валидационная выборка использовалась для определения оптимального значения  $k$  [15, 16]. При каждом новом этапе определения оптимального  $k$  в качестве валидационной области выбирался новый массив из обучающей выборки (Рис. 7).

При расчете ошибки для каждого объекта валидационной выборки рассчитывалось Евклидово расстояние до всех остальных точек тренировочных данных по следующей формуле:

$$d(X, Y) = \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2 \quad (2)$$

где  $d$  - расстояние между объектами;  $X$  - объект тренировочных данных;  $Y$  - объект валидационных данных;  $i$  - номер признака;  $m$  - количество признаков.

В соответствии с методикой  $k$ -ближайших соседей были проведены следующие расчеты:

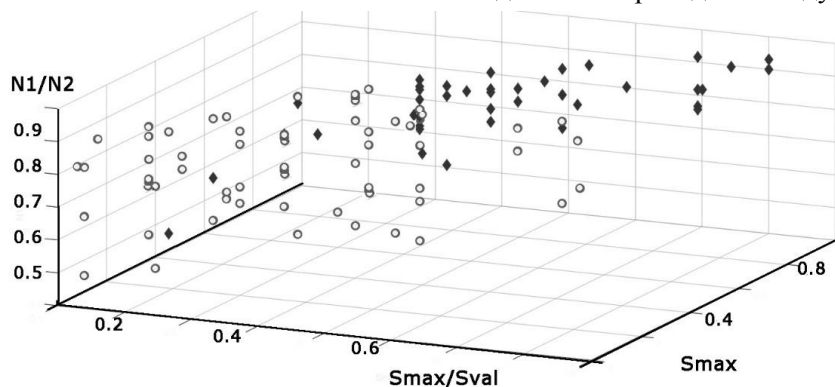


Рис. 6. Диаграмма распределения совпадающих (ромбы) и несовпадающих (кружки) пар вторичных следов

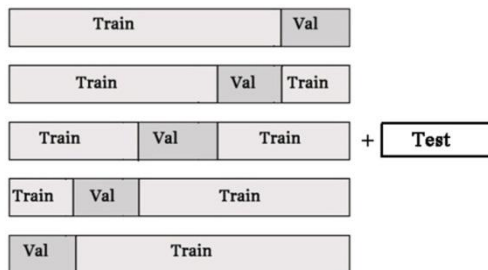


Рис. 7. Кросс-валидационный метод определения оптимального  $k$



1. Для каждой отдельной валидационной выборки для каждого значения  $k$  рассчитана средняя ошибка.

2. Для каждого значения  $k$  рассчитана общая средняя по всем валидационным выборкам ошибка.

3. В качестве оптимального значения  $k$  из всех  $k$  выбрано то, которое характеризуется наименьшей общей средней ошибкой.

При оценке точности бинарного прогнозирования категории пар анализируемых объектов исходили из предположения, что значимость ложноположительной и ложноотрицательной ошибки примерно одинаковая. Поэтому точность прогнозирования определялась в соответствии с формулой (3) по которой рассчитывается доля правильных прогнозов из всех данных прогнозов:

$$Accuracy = correct/total \quad (3)$$

где *correct* – число корректно данных прогнозов; *total* – общее число прогнозов.

Как уже отмечалось, для перекрестной проверки обучающая база данных была разбита на 5 частей по 20 объектов в каждой. Расчеты показали, что для данной обучающей выборки оптимальное значение  $k$  равно 5.

## 5. Реализация метода $k$ -NN

Этот этап схож с предыдущим с той лишь разницей, что уже определено оптимальное значение  $k$ , сформированы массивы обучающих и тестовых данных. Алгоритм этого этапа начинался с перебора точек тестовой выборки. Для каждой ее точки рассчитывалось расстояние до всех точек обучающих данных. Расстояния сшивались в вектор-столбец и отсортировывались по возрастанию. Определялась преобладающая категория (из точек с наименьшим расстоянием) для оптимального значения  $k=5$  и рассчитывалась ошибка, исходя из результатов.

Итогом работы программы был набор рассчитанных категорий для каждого объекта тестовой выборки. Поскольку истинные категории тестовых объектов известны, то была определена погрешность метода. Расчеты показали, что точность прогнозирования, рассчитанная по формуле (3), составила 87%, а ошибка была равна соответственно 13%.

## 6. Дискуссия

1. CMPS методика открывает новые возможности идентификации оружия по изображениям вторичных следов, полученным с высоким пространственным разрешением порядка 1 мкм на пиксель и выше. Актуальность применения изображений с таким высоким разрешением при идентификации оружия по следам на выстреленных пулях представлена в работе [17]. Одной из принципиальных проблем эффективного сравнения изображений динамических следов с высоким разрешением является «расхождение» совпадающих тонких трасс (шириной 1-2 мкм и менее) при совмещении полных разверток следов. На Рис. 8,а) представлены развертки совпадающих вторичных следов, полученные покадровым сканированием на растровом электронном микроскопе пуль, выстреленных из одного экземпляра оружия. Видно, что наблюдаются локальные расхождения трасс шириной 1-3 мкм. Причины расхождения совпадающих трасс разные: наличие пусть даже слабой деформации одной пули относительно другой; неудачная «сшивка» кадров; искажения следовой картины, обусловленные цилиндрической поверхностью пуль и др.

Расчеты, проведенные в соответствии с CMPS методикой, показали принципиальную возможность оценки данным методом схожести изображений следов, полученных с высоким разрешением. Например, при разбиении исследуемого следа (верхний след на Рис. 8, а) на 15 сегментов, из 11 признанных пригодными к корреляции, максимумы удовлетворяют условию конгруэнтности на функциях взаимной корреляции для 9 сегментов (Рис. 8, в). Такое число конгруэнтно расположенных максимумов ФВК является явным признаком криминалистической тождественности анализируемых следов (Рис. 6). Для иллюстрации высокой схожести исследуемых следов на Рис. 8, б) представлено совмещение этих же следов при подстройке в пределах 10 мкм каждого кадра второго следа (5 кадров). Видно практически идеальное совмещение многих трасс, что косвенно подтверждает эффективность CMPS метода для оценки схожести следов, полученных с таким высоким разрешением.

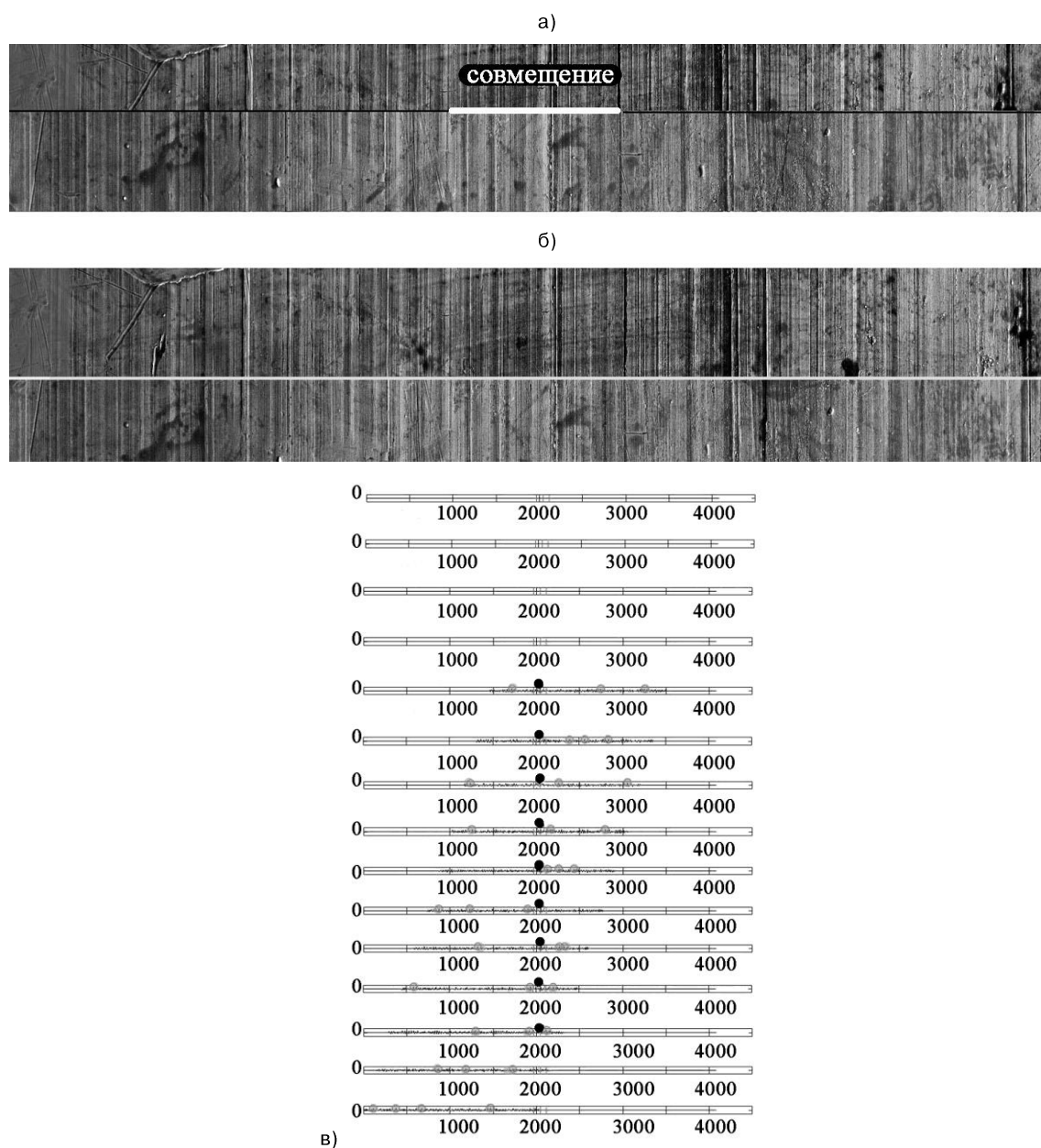


Рис. 8. а) - следы, сформированные одним полем нареза без покадровой подстройки; б) - следы, сформированные одним полем нареза после покадровой подстройки; в) – диаграмма распределения максимумов ФВК с наибольшими значениями

2. Исходя из общих соображений можно предположить, что оптимальное число разбиений определяется двумя факторами: величиной деформации одной пули относительно другой, например, исследуемой пули относительно тестовой; числом трасс в исследуемом следе (чем больше трасс, тем на большее число сегментов можно разбить).

## Заключение

В работе исследована эффективность комбинированной методики классификации следов полостей нарезов на деформированных пулях, основанной на последовательном применении CMSP метода и метода  $k$  – ближайших соседей. Проведенные исследования показали следующее:

1. Применение метода  $k$  – ближайших соседей на финальном этапе анализа признаков сравниваемых следов, рассчитанных с помощью CMPS метода, позволяет более надежно проводить бинарную классификацию следов.

2. Показана эффективность CMPS метода при оценке схожести изображений следов, полученных с высоким разрешением, что расширяет возможности идентификации оружия по следам на выстреленных пулях.

## Литература

1. Кокин А. В., Ярмак К. В. Судебная баллистика и судебно-баллистическая экспертиза: учебник. М.: Юнити-Дана, 2015. 351 с.
2. PCAST. Report to the President – Forensic Science in Criminal Courts : Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods. September 2016. Available at: <http://www.documentcloud.org/documents/3121011-Pcast-Forensic-Science-Report-Final.html> (accessed February 4, 2020)
3. Федоренко В. А., Навроцкая Е. В. Критерии и алгоритм оценки уникальности комплексов совпадающих трасс в следах на выстреленных пулях // Информационные технологии и вычислительные системы, 2019. № 1. С. 110-120.
4. Hare, Eric Riemer, "Statistical methods for bullet matching" (2017). Graduate Theses and Dissertations. 15315. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/15315>
5. Banno A. 2004. Estimation of Bullet Striation Similarity Using Neural Networks. Journal of Forensic Sciences. 49(3): 1–5. doi: 10.1520/JFS2002361.
6. Pisantanoj P., Tanpisuth P., Sinchanawat P. et al. 2020. Automated Firearm Classification From Bullet Markings Using Deep Learning. IEEE Access. 8: 78236–78251. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989673.
7. Федоренко В. А., Сорокина К. О. Компенсация искажений изображений следов на деформированных пулях для их автоматизированного сравнения // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право, 2018. Т. 18, вып. 2. С. 227–231. doi: 10.18500/1994-2540-2018-18-2-227-231.
8. Федоренко В.А. Количественные критерии обоснования тождественности вторичных следов на пулях, выстреленных из АК-74// Теория и практика судебной экспертизы/ Том 14, №3 (2019), с. 54-62.
9. Федоренко В.А., Илясов Ю.В. Применение комплекса «Кондор» в экспертных исследованиях и учебном процессе// Судебная экспертиза/ 2006., №4, с.60-64.
10. <http://www.sbc-spb.com/> (время обращения 11.01.2021)
11. Chen Z., Chu W., Soons J. A., Thompson R. M., Song J., Zhao X. 2019. Fired bullet signature correlation using the Congruent Matching Profile Segments (CMPS) method. Forensic Science International. 305:10-19.
12. Zhe Chen, John Song, Johannes A. Soons, Robert M. Thompson, Xuezheng Zhao. 2020. Pilot study on deformed bullet correlation. Forensic Science International. 306 (2020): 1-11.
13. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. 2009. Digital Image Processing Using MATLAB. London: Gatesmark Publishing. 827 p.
14. Changmai P., Bora K., Suresh R., Deb N., Mahanta L. B. 2019. On the study of automated identification of firearms through associated striations. 31st International Symposium on Ballistics: Lancaster, PA. doi: 10.12783/ballistics2019/33156
15. Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. Машинное обучение. СПб. : Питер, 2017. 336 с.
16. Открытый курс машинного обучения. Тема 3. Классификация, деревья решений и метод ближайших соседей [Электронный ресурс]// Хабр: [сайт]. [2017]. URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/322534> (дата обращения: 29.12.2020)
17. Pavel Giverts, Gil Hocherman, Lionel Bokobza and Bernard Schecter. 2013. Interdetermination of Three Microscopic Methods for Examination of Striae on Polygonal Bullets. AFTE Journal -- Volume 45 Number 1, p.48-51.

**Федоренко Владимир Александрович.** ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», Саратов, Россия, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, доцент. Количество печатных работ: более 100 (в т.ч. 2 монографии). Область научных интересов: судебная баллистика, идентификация огнестрельного оружия, обработка цифровых изображений. E-mail: fed77@yandex.

**Сорокина Ксения Олеговна.** Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (СГТУ), г. Саратов, Россия. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Количество печатных работ: 5. Область научных интересов: математическое моделирование, судебная баллистика, информационные технологии. E-mail: lorredos@gmail.com

**Гиверц Павел Витальевич.** Баллистическая лаборатория криминалистического управления полиции Израиля, г. Иерусалим, Израиль. M.Sc. mechanical engineering, Количество печатных работ: 30. Область научных интересов: судебная баллистика, идентификация огнестрельного оружия. E-mail: pavel.giverts@gmail.com

## Analysis of the Traces on the Discharged Bullets by the Congruent Matching Profile Segments Method and the *k*-Nearest Neighbors

V. A. Fedorenko<sup>I</sup>, K. O. Sorokina<sup>II</sup>, P. V. Giverts<sup>III</sup>

<sup>I</sup>Saratov State University, Saratov, Russia

<sup>II</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

<sup>III</sup>Ballistic Laboratory of Israel Police, Jerusalem, Israel

**Abstract.** The article discusses the problem of classification into the categories of “match” and “non-match” for compared images of land impressions on discharged bullets. The aim of the research is to increase the effectiveness of the comparison of images of land impressions by the congruent matching profile segments (CMPS) method. The scientific novelty is in adding to the analysis an additional independent feature, as well as the use of the *k*-nearest neighbors algorithm at the final stage of traces comparison. The research shows that the accuracy of the classification for the compared pairs of the land impression images by the combined method is about 87%. The work establishes that the analysis of the images by the CMPS method makes it possible to effectively compare images of land impressions with high resolution (less or about 1 μm per pixel). The research is of interest to software developers of automated ballistic identification systems.

**Keywords:** the congruent matching profile segments method, land impression mark, correlation, classification, *k*-nearest neighbors algorithm/

DOI 10.14357/20718632210108

## References

1. A.V. Kokin, K.V. YArmak Sudebnaya ballistika i sudebno-ballisticheskaya ehkspertiza// Uchebnik. Moskva: YUNITI: Zakon i pravo. [Judicial ballistics and forensic ballistic examination // Textbook. Moscow: UNITY: Law] 2015. - 350 p.
2. PCAST. Report to the President - Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of FeatureComparison Methods. September 2016.
3. Fedorenko V. A., Navrotskaya E. V. Kriterii i algoritm otsenki unikal'nosti kompleksov sovpadayushchikh trass v sledakh na vystrelennykh pulyakh // [Criteria and algorithm for evaluating the uniqueness of complexes of matching tracks in traces on fired bullets // Information Technologies and computing systems], 2019. No. 1. pp. 110-120.
4. Hare, Eric Riemer, "Statistical methods for bullet matching" (2017). Graduate Theses and Dissertations. 15315. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/15315>
5. Banno A. 2004. Estimation of Bullet Striation Similarity Using Neural Networks. Journal of Forensic Sciences. 49(3): 1–5. doi: 10.1520/JFS2002361.
6. Pisantanaraj P., Tanpisuth P., Sinchawanwat P. et al. 2020. Automated Firearm Classification From Bullet Markings Using Deep Learning. IEEE Access. 8: 78236–78251. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989673.
7. Fedorenko V. A., Sorokina K. O. Kompensatsiya iskazheniy izobrazheniy sledov na deformirovannykh pulyakh dlya ikh avtomatizirovannogo sravneniya [Compensation of distortion of images of traces on deformed bullets for their automated comparison. // Sarat. un-ta. New ser. Ser. Economy. Management. Pravo], 2018. Vol.18, vol. 2. S. 227-231. doi: 10.18500/1994-2540-2018-18-2-227-231.
8. Fedorenko V.A. Kolichestvennyye kriterii obosnovaniya tozhdestvennosti vtorichnykh sledov na pulyakh, vystrelennykh iz AK-74// Teoriya i praktika sudebnoy ekspertizy/ [Quantitative Identification Criteria for Secondary Toolmarks on Bullets Shot from AK-74// Theory and Practice of Forensic Science] Tom 14, №3 (2019), pp. 54-62.
9. Fedorenko V.A., Ilyasov Yu.V. Primenenie kompleksa «Kondor» v ekspertnykh issledovaniyakh i uchebnom protsesse// Sudebnaya ekspertiza/[Application of the "Condor" complex in the expert research and educational process// Forensic Examination] 2006., №4, P. 60-64.
10. <http://www.sbc-spb.com/> (время обращения 11.01.2021)
11. Chen Z., Chu W., Soons J. A., Thompson R. M., Song J., Zhao X. 2019. Fired bullet signature correlation using the Congruent Matching Profile Segments (CMPS) method. Forensic Science International. 305:10-19.
12. Zhe Chen, John Song, Johannes A. Soons, Robert M. Thompson, Xuezheng Zhao. 2020. Pilot study on deformed bullet correlation. Forensic Science International. 306 (2020): 1-11
13. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. 2009. Digital Image Processing Using MATLAB. London: Gatesmark Publishing. 827 p.
14. Changmai P., Bora K., Suresh R., Deb N., Mahanta L. B. 2019. On the study of automated identification of firearms through associated striations. 31st International Symposium on Ballistics: Lancaster, PA. doi: 10.12783/ballistics2019/33156

15. Brink Kh., Richards D., Feverolf M. Mashinnoe obuchenie. SPb. : Piter, 2017. 336 p.
16. Otkrytyy kurs mashinnogo obucheniya. Tema 3. Klassifikatsiya, derev'ya resheniy i metod blizhayshikh sosedey [Elektronnyy resurs]// Habr: [sayt]. [2017]. URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/322534> (data obrashcheniya: 29.12.2020)
17. Pavel Giverts, Gil Hocherman, Lionel Bokobza and Bernard Schecter. 2013. Interdetermination of Three Microscopic Methods for Examination of Striae on Polygonal Bullets. AFTE Journal -- Volume 45 Number 1, pp.48-51.

**Fedorenko V.A.** Candidate of Physico-Mathematical Sciences. Head of the educational and scientific laboratory of forensic materials engineering of the Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, e-mail: fed77@yandex.ru

**Sorokina K. O.** Postgraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politechnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia, e-mail: lorredos@gmail.com

**Giverts P. V.** Division of Identification and Forensic Science, National Police HQ, Haim Bar-Lev road, Jerusalem, 91906, Israel, e-mail: pavel.giverts@gmail.com