

## Оценка схожести изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек

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

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

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

**Аннотация.** В работе исследуется эффективность применения метода корреляционных ячеек для оценки схожести цифровых изображений следов патронного упора. Актуальность работы определяется необходимостью повышения качества проведения проверок по цифровым изображениям следов на стреляных гильзах при расследовании преступлений, связанных с применением огнестрельного оружия. Целью работы является разработка эффективного метода оценки схожести изображений следов патронного упора, отобразившихся на поверхности капсюлей на стреляных гильзах. Показано, что разбиение исследуемых изображений на ячейки совместно с удалением малоинформативных областей, позволяет повысить чувствительность корреляционного метода и получить дополнительную информацию о пространственной связанности признаков сравниваемых изображений. На основе рассчитанных коэффициентов правдоподобия сформулированы критерии отнесения следов к категории «совпадающие» или «несовпадающие». Данный метод предназначен для выявления следов патронного упора с одним и тем же узором в массиве цифровых изображений донных частей гильз.

**Ключевые слова:** коэффициент корреляции, функция взаимной корреляции, обработка цифровых изображений, корреляционные ячейки, следы патронного упора, кластер, коэффициент правдоподобия.

DOI 10.14357/20718632190301

### Введение

В качестве меры схожести изображений может выступать коэффициент корреляции или максимум функции взаимной корреляции (ФВК). Однако из общих соображений ясно, что на результаты корреляции будут оказывать негативное влияние все яркостные неоднородности исследуемых поверхностей, не относящиеся к следам патронного упора. Чтобы по возможности исключить из корреляционного анализа неоднородности, не связанные с исследуемыми следами, в работах [1, 2] был предложен метод конгруэнтных совпадающих ячеек. Достоинством данного метода является то, что в корреляционном анализе участвуют только ячейки, содержащие информацию о сравниваемых следах. В результате для совпадающих

следов удается получить высокую корреляцию по ячейкам.

**Основные группы следов оружия, отобразившиеся на дне стреляной гильзы.** При выстреле из автоматического огнестрельного оружия на дне гильзы формируются следы бойка, патронного упора, отражателя, окна под ударник и другие менее значимые и выраженные следы (Рис. 1). Одними из наиболее информативных являются следы бойка и патронного упора, поэтому по ним чаще всего проводится идентификация оружия. Кроме этого, следы патронного упора используются как для быстрой фильтрации объектов, стреляных в разных экземплярах оружия (т.е. установления факта несовпадения сравниваемых следов патронного упора), так и для обнаружения следов бойков с так называемыми «подклассовыми»

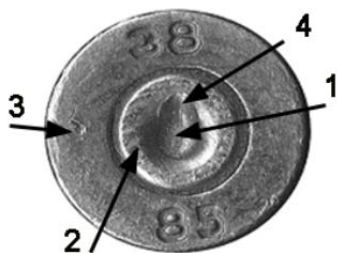


Рис. 1. Следы на донной части гильзы

1 – статическая часть следа бойка; 2 – след патронного упора; 3 – след отражателя; 4 – динамическая часть следа бойка (вызвана качанием ствола в вертикальной плоскости)

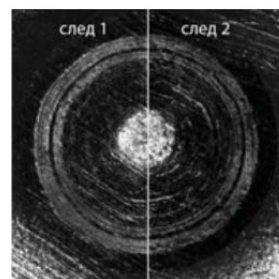


Рис.2. Следы бойков с идентичными наборами признаков в виде окружностей и дуг на гильзах, стреляных в разных экземплярах пистолета Макарова с номерами

след 1 – РТ 0528; след 2 – РТ 0580

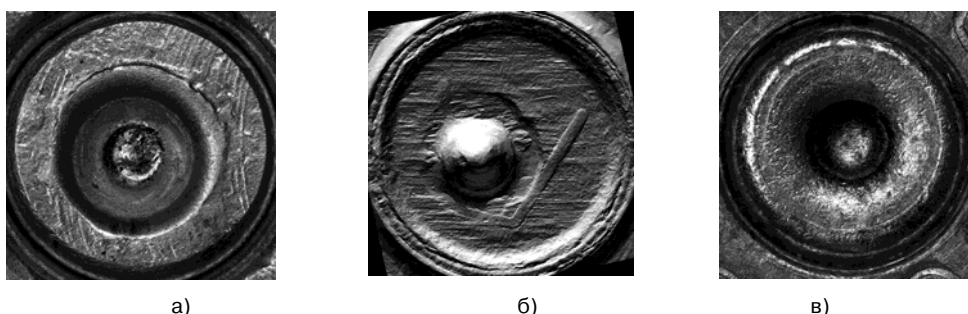


Рис.3. Следы патронного упора  
а) – в виде дуг; б) – в виде линий и полос; в) – в виде окружностей

характеристиками [3]. Признаки в таких следах практически совпадают, хотя сами следы оставлены разными бойками, обработанными одним инструментом без значительного износа, перезаточки или изменения его режущей кромки. Т.е. фактически речь идет о выявлении факта совпадения следов производства. В качестве иллюстрации на Рис. 2 представлено совмещение следов бойков разных экземпляров оружия с совпадающими признаками в виде окружностей и дуг.

На Рис. 3 в качестве примера представлены часто встречающиеся следы патронного упора, которые формируются в основном на относительно пластичной поверхности капсюля. Видно, что основу составляют признаки в виде различных линий, дуг, окружностей.

**Факторы, негативно сказывающиеся на результатах корреляционного анализа.** Из общих соображений ясно, что все яркостные неоднородности (исследуемые следы, случайные неоднородности, маркировки на капсюлях и т.д.) анализируемых изображений вносят вклад в коэффициент корреляции. Для исключения негативного влияния областей, не содержащих ин-

формацию об исследуемых следах, они удалялись из последующего анализа. К таким областям относятся прежде всего: следы бойков вместе с кольцеобразной областью вздутия (Рис. 4 а, отм.1) и следы объемной маркировки (Рис. 4 а, отм.2), границы капсюля (Рис. 4 а, отм.3) различные каверны и шероховатости на поверхности капсюля (Рис. 4 б), следы производства фольги колпачка капсюля в виде набора параллельных трасс (Рис. 4 в) [4]. Негативное влияние следов производства колпачка капсюля можно уменьшить путем применения сглаживающих фильтров на этапе предварительной обработки исходных изображений.

### 1. Оценка схожести следов патронного упора методом корреляционных ячеек

**Коэффициент корреляции и функция взаимной корреляции.** Для двумерных изображений степень их зависимости (схожести) может быть определена через коэффициент линейной корреляции, или через функцию взаимной корреляции. В первом случае матрицы анализиру-

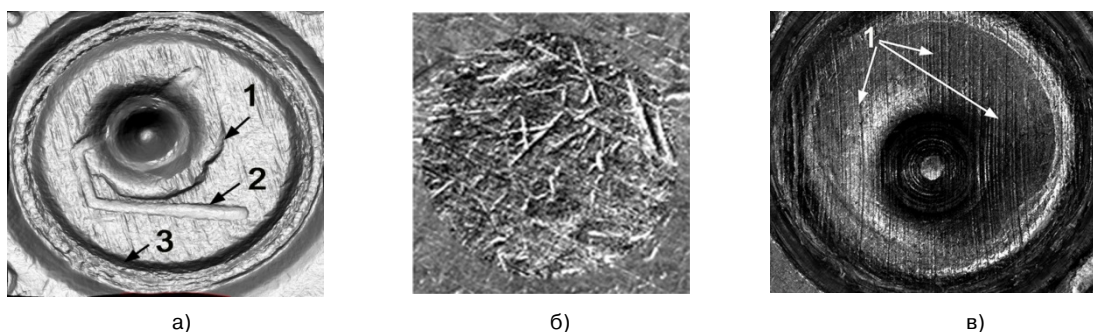


Рис. 4. Виды основных яркостных неоднородностей на изображении, не относящихся к следам патронного упора

а) – крупные неоднородности: след боя с областью вздутия (отм.1), след объемной маркировки (отм.2), края капсюля (отм.3); б) – шероховатости на поверхности капсюля; в) – следы производства колпачка капсюля (отм.1)

емых изображений должны иметь одну размерность и коэффициент находится для двух наборов данных по формуле (1).

$$R = \frac{\sum(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum(x_i - x_{cp})^2 \sum(y_i - y_{cp})^2}}, \quad (1)$$

где  $x_{cp}$  и  $y_{cp}$  являются средними значениями множества  $\{x_i\}$  и  $\{y_i\}$  соответственно.

При нахождении функции взаимной корреляции одно изображение (обычно меньшее) скользит по большему изображению (сцене), для каждой позиции рассчитывается коэффициент корреляции, данное значение присваивается центральному элементу матрицы-маски. В результате формируется трехмерная функция: по осям  $x$  и  $y$  откладываются координаты пикселей, а по оси  $z$  – значения коэффициента корреляции. Максимум ФВК указывает на степень схожести изображений, а положение максимума соответствует координатам центрального элемента маски, при котором наблюдается максимальная схожесть изображений. Функция взаимной корреляции рассчитывается по формуле (2):

$$P = \frac{\sum(F_{i,j} - F_s) * (G_{i,j} - G_s)}{\sqrt{\sum(F_{i,j} - F_s)^2 * \sum(G_{i,j} - G_s)^2}}, \quad (2)$$

где  $F_{i,j}$  – значение элемента матрицы изображения сцены;

$F_s$  – средняя яркость изображения сцены;

$G_{i,j}$  – значение элемента матрицы исследуемого изображения (маски);

$G_s$  – среднее значение элемента матрицы исследуемого изображения.

Следы патронного упора часто представляют собой относительно тонкие прерывистые линии, выраженность которых не превосходит

выраженность многочисленных поверхностных неоднородностей. Поэтому чувствительность корреляционного анализа к таким следам является низкой. Одним из наиболее перспективных методов оценки схожести следов патронного упора на сегодняшний день считается метод «конгруэнтных совпадающих ячеек» (СМС - Congruent Matching Cells), разработанный доктором Дж. Сонгом в Национальном Институте стандартов и технологий США [1, 2, 5]. Суть методики заключается в разбиении сопоставляемых следов на равные ячейки, поиске методами корреляционного анализа на втором следе ячеек со сходными характеристиками, сравнения расположения хорошо коррелирующих ячеек на анализируемых изображениях. К несомненным достоинствам данного метода следует отнести произвольную ориентацию сопоставляемых изображений и автоматический поиск ячеек со схожими фрагментами изображений. К недостаткам – сложный анализ положений коррелирующих ячеек на исследуемых изображениях в условиях сильных пространственных шумов и вариативности самих следов, а также негативное влияние следов объемной маркировки, которые не были исключены из корреляционного анализа.

С использованием некоторых положений этого метода и с целью исключения влияния достаточно ярких неоднородностей поверхности капсюля не относящихся к следам патронного упора на результаты анализа, был разработан описанный в данной работе метод корреляционных ячеек. Основные отличия предлагаемого метода от прототипа заключаются в следующем. Во-первых, все анализиру-

емые изображения разбиваются на одну сеть ячеек и для каждой пары ячеек пригодных к корреляции, находится максимум коэффициента корреляции при различных сдвигах исследуемого изображения относительно начального положения; Во-вторых, из корреляционного анализа исключаются области, негативно влияющие на результаты расчетов (объемная маркировка на поверхности капсуля, крупные неоднородности, вызванные производственной обработкой поверхности капсуля). В-третьих, в предлагаемом методе корреляционных ячеек вводится дополнительный признак схожести следов в виде кластерного характера распределения максимумов коэффициентов корреляции парных ячеек на диаграмме сдвигов. В-четвертых, за счет дополнительного разбиения изображений на более мелкие ячейки и анализа автокорреляционной функции для каждой ячейки, из последующего исследования исключаются области, не содержащие яркостных неоднородностей.

**Метод корреляционных ячеек.** В данной работе предполагается, что анализируемые изображения ориентированы одинаковым образом в пределах  $\pm 3^\circ$  по углу и  $\pm 10\%$  по координатам  $x, y$ . В большинстве случаев эту позицию удается установить по расположению следов на гильзе (по ориентации динамической части следа бойка, положению следов отражателя и зацепа выбрасывателя, следам повторного отражения и др.) [6].

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. На первом этапе выделяются области, не содержащие информацию об анализируемых следах, которые названы областями «непригодными к корреляции». Далее изобра-

жения разбиваются на одну и ту же сетку равных ячеек [1, 2]. Ячейки, содержащие области изображения со следами патронного упора, признаются пригодными к корреляции, а ячейки, не включающие таких областей – соответственно «непригодными к корреляции».

Таким образом, для каждого изображения формируется множество ячеек пригодных к корреляции и множество ячеек «непригодных к корреляции». Пусть первое изображение  $A$  содержит множество пригодных к корреляции ячеек  $A^+$  и множество ячеек «непригодных к корреляции»  $A^-$ . Второе изображение  $B$  аналогично содержит множества  $B^+$  и  $B^-$ . Тогда пригодные к корреляции пары ячеек образуют множество  $M$ :

$$M \in A^+ \cap B^+.$$

Коэффициент корреляции  $R$  или ФВК рассчитывается для пар ячеек, пригодных для корреляции и является их функцией:

$$R = \phi(A^+ \cap B^+). \quad (3)$$

Из корреляционного анализа исключаются пары ячеек, входящие в множество  $N$ :

$$N \in (A^+ \cap B^-) \cup (A^- \cap B^+) \cup (A^- \cap B^-). \quad (4)$$

На Рис. 5 представлены изображения следов патронного упора с удаленными областями (черный фон) и нанесенной сеткой корреляционных ячеек.

Оценка схожести изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек включает следующие основные операции:

1. Предварительная обработка изображений, включающая выравнивание освещения и сглаживание изображений фильтром Гаусса;
2. Исключение из анализа «непригодных для корреляции» ячеек;

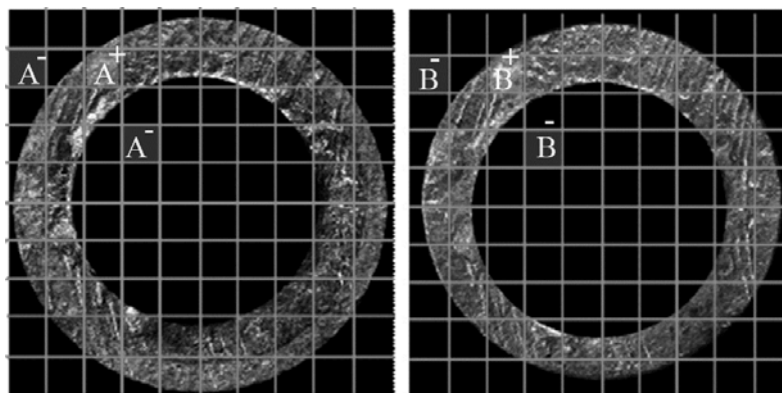


Рис. 5. Изображения следов патронного упора с удаленными областями и сеткой корреляционных ячеек

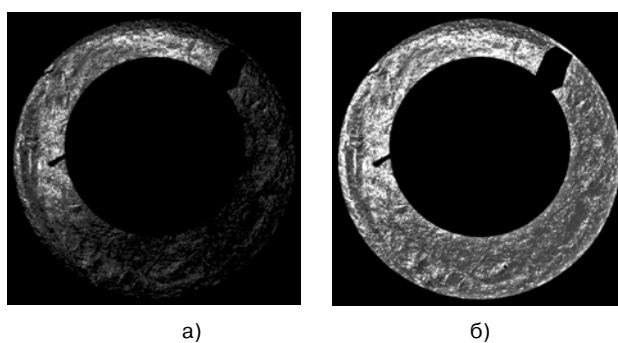


Рис. 6. Изображение следа патронного упора

а) – исходное изображение с неоднородной яркостью; б) – изображение после выравнивания яркости

3. Определение максимальных значений коэффициента корреляции для парных ячеек;

4. Исследование положений максимумов коэффициентов корреляции на диаграмме сдвигов, определение наличия кластера;

5. Определение центра кластера методом последовательных приближений;

6. Деление анализируемых изображений на более мелкие ячейки;

7. Определение максимума функции взаимной корреляции анализируемых изображений с удаленными областями;

8. Оценка коэффициента правдоподобия для совпадающих и несовпадающих следов патронного упора.

Рассмотрим более подробно основные операции.

**Предварительная обработка изображений.** Изображения следов патронного упора с пространственным разрешением 700x700 пикселей в градациях серого были получены с помощью автоматизированного баллистического идентификационного комплекса «POISC», а также автоматизированной баллистической системы «IBIS» [7, 8]. Для обеспечения единой ориентации анализируемых изображений, их положение в пространстве соответствовало положению гильзы в патроннике оружия.

Для уменьшения негативного влияния неоднородности засветки, предварительно проводилось выравнивание изображений по яркости методом гомоморфной обработки [9, 10], который заключается в следующем. Исходное изображение  $f$  представлялось в виде произведения двух сигналов – высокочастотного, содержащего информацию о топографических особенно-

стях микрорельефа, и низкочастотного, определяемого плавным изменением освещенности в пространстве. Для разделения низкочастотной и высокочастотной составляющей вычислялся логарифм от изображения, который можно представить следующим образом:

$$\log(f(x, y)) = \log(f_{high}(x, y)) + \log(f_{low}(x, y)), \quad (5)$$

где  $f(x, y)$  – функция яркости исследуемого изображения;  $x, y$  – пространственные координаты;

$f_{high}(x, y), f_{low}(x, y)$  – высокочастотная и низкочастотная составляющие исследуемого изображения.

Низкочастотная компонента выделялась с помощью фильтра Гаусса размерностью порядка 71x71 пиксель. Вычитание последней из исходного изображения позволяло получать логарифм высокочастотной составляющей изображения. После взятия экспоненты от высокочастотной составляющей и последующего сложения в определенной пропорции с исходным изображением, получали изображение с уменьшенной низкочастотной составляющей:

$$F(x, y) = K * f(x, y) + L * e^{\log(f_{high}(x, y))}, \quad (6)$$

где  $K, L$  – экспериментально подбираемые коэффициенты, для исследуемого типа изображений равные 0.7 и 0.3 соответственно;  $F(x, y)$  – изображение с выровненной яркостью.

В качестве примера на Рис. 6 а, б представлено изображение до и после выравнивания яркости соответственно. Для уменьшения пространственных шумов к изображениям применялся фильтр Гаусса размером 5x5.

**Исключение из анализа «непригодных для корреляции» ячеек.** Следующим этапом предварительной обработки является удаление оператором из последующего анализа областей, явно не содержащих информацию о следах патронного упора. К таким областям относятся, в первую очередь, след бояка, след объемной маркировки, края капсюля и т.д. Данные области выделялись и заливались цветом фона (в данном случае черным цветом) и в последующем исключались из корреляционного анализа. На Рис. 7 представлены исходные изображения следов патронного упора, а на Рис. 8 эти же изображения после удаления областей явно не содержащих информацию о следах патронного упора.

Далее изображения разбивались на ячейки. Как было установлено опытным путем, для изображений размером порядка  $700 \times 700$  пикселей оптимальной является сетка  $10 \times 10$  ячеек. Если изображение не делится нацело на ячейки, то оно равномерно дополняется по бокам черными пикселями до нужного размера. Также было принято правило, что ячейки, в которых более 50% площади занимает область «непригодная к корреляции» или содержатся протяженные яркостные неоднородности явно не связанные с исследуемыми следами, считаются «непригодными к корреляции». На Рис. 9 представлены изображения совпадающих следов патронного упора с удаленными областями, разделенные на одни и те же ячейки. В качестве примера выделены две пары ячеек  $A^{+}_{23}$  и  $B^{+}_{23}$ ;  $A^{+}_{25}$  и  $B^{+}_{25}$  пригодные к корреляции. Ячейки, «непригодные к корреляции» заретушированы наклонными линиями и залиты серым цветом.

**Определение максимальных значений коэффициента корреляции для парных ячеек.** В соответствии с данной методикой для каждой пары ячеек по формуле (1) находится максимальное значение коэффициента корреляции  $R$ . Для этого одно из изображений (исследуемое) сдвигается под сеткой с шагом 1 пиксель. При каждом сдвиге исследуемого изображения проводится анализ его ячеек на пригодность к корреляции, и далее для каждой пары пригодных к корреляции ячеек рассчитывается коэффициент корреляции. Значение рассчитанного коэффициента корреляции для каждой пары ячеек сравнивается с предыдущим значением коэф-

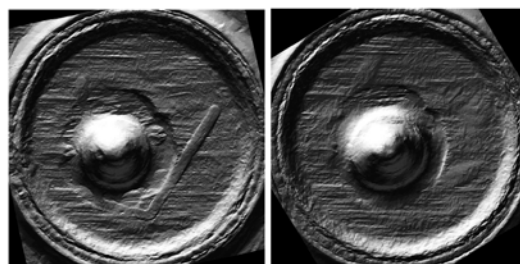


Рис. 7. Исходные изображения поверхности капсюля на стреляных гильзах, полученные с помощью автоматизированной баллистической системы «IBIS»



Рис. 8. Изображения поверхности капсюля на стреляных гильзах после удаления областей, не содержащих следов патронного упора

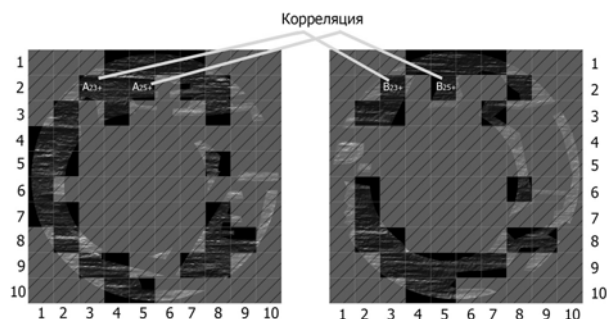


Рис. 9. Изображение с удаленными областями, разделенное на корреляционные ячейки

фициента. Если новое значение коэффициента выше, то оно записывается в ячейку памяти вместо старого, если нет, то сохраняется старое. Дополнительно фиксируется сдвиг, при котором наблюдается максимальное значение коэффициента корреляции.

Максимальные значения коэффициента корреляции для парных ячеек менее 0.3 обычно обусловлены шумовыми неоднородностями и из последующего анализа такие ячейки исключаются. В результате проведенных расчетов на диаграмме сдвигов исследуемого изображения формируется распределение максимальных значений  $R$ . Отдельные пары ячеек для совпадающих следов ха-

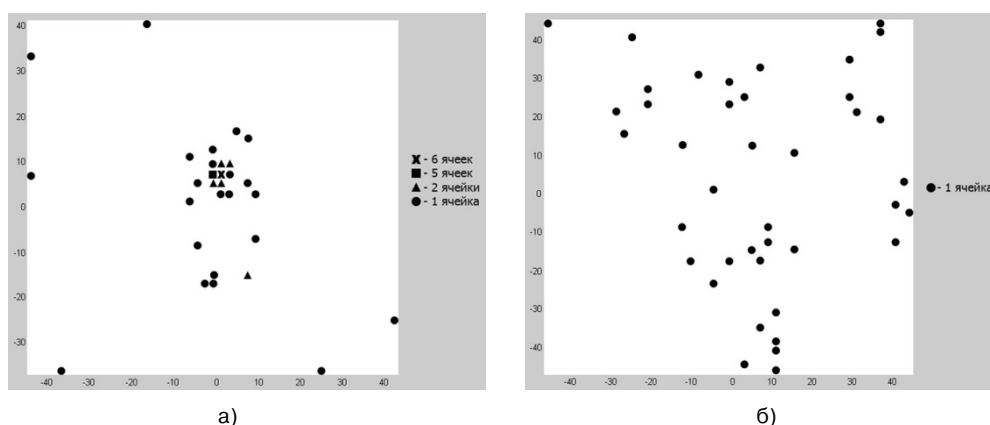


Рис. 10. Распределение максимальных значений R на диаграмме сдвигов

а) – для совпадающих следов патронного упора; б) – для несовпадающих следов патронного упора

рактируются значениями коэффициента корреляции в пределах 0.6-0.7. Для совпадающих следов типичным признаком является концентрация максимальных значений  $R$  на небольшой области диаграммы сдвигов, аналогичная формированию кластера. Для несовпадающих следов характерным признаком является достаточно равномерное распределение максимумов на всей диаграмме сдвигов, что подтверждает случайный характер их появления. На Рис.10 а, б представлены типичные распределения максимумов  $R$  для изображений с совпадающими и несовпадающими следами патронного упора.

**Исследование положений максимумов коэффициентов корреляции на диаграмме сдвигов.** Детектор положений максимумов ( $Q$ ) представляет собой единичную прямоугольную маску, по которой производится свертка с матрицей диаграммы сдвигов ( $S$ ). Из Рис. 10 а видно, что диаграмма сдвигов представляет собой матрицу, элементы которой равны числу максимумов, наблюдаемых при таких сдвигах. Маска  $Q$  перекрывает  $1/9$  площади диаграммы сдвигов и ее размер равен  $m/3, n/3$ , где  $m, n$  размерность матрицы диаграммы сдвигов по оси  $x$  и оси  $y$  соответственно. При необходимости размеры маски могут быть увеличены или уменьшены.

Принцип действия детектора следующий. Единичная прямоугольная маска  $Q$  перемещается с шагом 1 по матрице диаграммы сдвигов  $S$ , при каждом смещении подсчитывается число ячеек с максимальным значением коэффициента корреляции (Рис. 11). Если в какой-то позиции число таких ячеек превышает 45% от их

общего числа, то считается, что кластер сформирован. В противном случае считается, что кластер отсутствует.

**Определение центра кластера методом последовательных приближений.** При обнаружении кластера далее определяется его центр методом последовательных приближений, который заключается в следующем:

1. Задается значение допустимой ошибки  $\Delta_{xy}$  в определении центра масс (ЦМ) распределения парных ячеек с максимальным значением коэффициента корреляции  $R$  на диаграмме сдвигов, например, равное 5 единичным сдвигам по  $X$  и  $Y$ .

2. Определяется ЦМ по всем корреляционным ячейкам на диаграмме сдвигов. Далее отбрасываются  $(N-N_1)/2$  наиболее удаленных от ЦМ ячеек и находится новый центр масс ЦМ1, где:  $N$  – общее число парных ячеек с максимальным значением  $R$ ;  $N_1$  – наибольшее число парных ячеек, входящих в кластер.

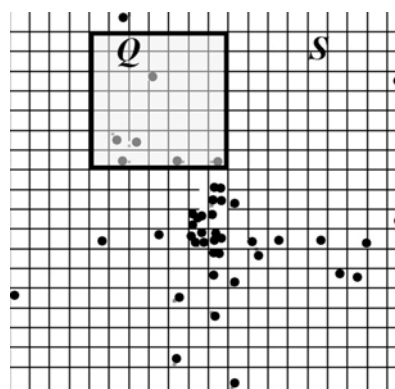


Рис. 11. Диаграмма сдвигов  $S$  с маской  $Q$

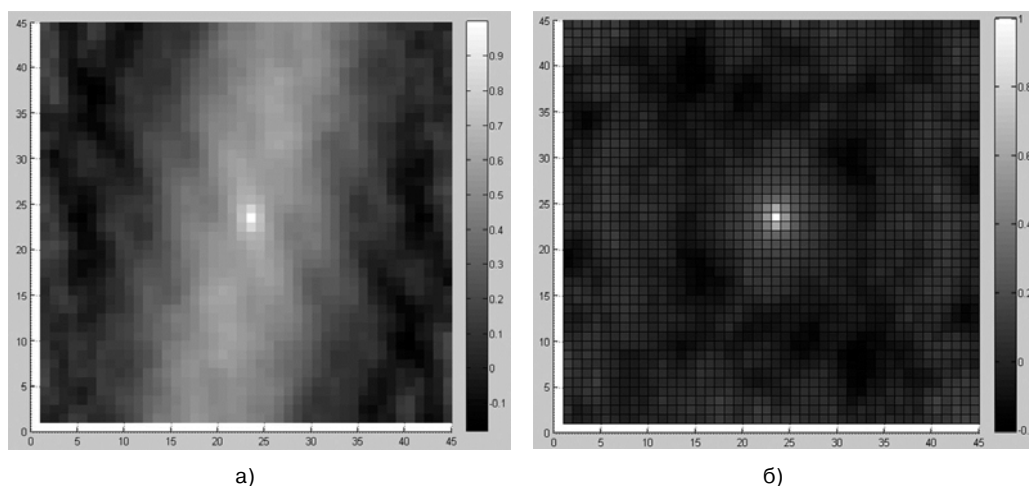


Рис. 12. График автокорреляции

а) – при наличии признака; б) – при отсутствии признака

3. Находится разность ( $\Delta l_{xy}$ ) между ЦМ и ЦМ1: если она меньше, чем  $\Delta_{xy}$ , то центром кластера считается ЦМ1; если  $\Delta l_{xy} > \Delta_{xy}$ , то исключаются 2 наиболее удаленные от ЦМ1 ячейки и находится новый ЦМ2.

4. Вновь проверяется условие: если  $\Delta 2_{xy} < \Delta_{xy}$ , то за центр кластера принимается значение ЦМ2, если же  $\Delta 2_{xy} > \Delta_{xy}$ , то цикл повторяется до тех пор, пока  $\Delta n_{xy}$  не станет меньше  $\Delta_{xy}$ . За центр кластера принимаются координаты последнего центра масс. В этом случае погрешность определения реального центра кластера лежит в пределах  $\pm \Delta n_{xy}$ .

**Деление анализируемых изображений на мелкие ячейки.** Анализируемые изображения, для которых был сформирован кластер, дополнительно разбиваются на более мелкие ячейки с целью обнаружения и последующего удаления областей, не содержащих яркостные перепады. Например, число разбиений на ячейки по горизонтали и вертикали было увеличено в 1.5 раза. Для каждой уменьшенной ячейки находится функция автокорреляции (АКФ). Если ячейка содержит изображение какого-либо перепада по яркости, то функция автокорреляции относительно плавно будет возрастать до единицы (Рис. 12 а). В противном случае АКФ в центре содержит узкий единичный пик (Рис. 12 б), что обусловлено присутствием мелких неоднородностей и точечных пространственных шумов. Такие ячейки обнуляются и исключаются из анализа. При разбиении сразу

на более мелкие ячейки, в последующем возникают сложности с идентификацией кластера из-за присутствия точечных пространственных шумов, которые формируют большое число максимумов коэффициента корреляции, не связанных с исследуемыми следами.

**Определение максимума функции взаимной корреляции анализируемых изображений.** При начальной позиции исследуемого изображения (положение центрального элемента исследуемого изображения), соответствующей найденному центру кластера, на интервале  $\pm \Delta_{xy}$  строилась функция взаимной корреляции сравниваемых изображений без разбиения их на ячейки, но с удалением непригодных областей, определенных на предыдущих этапах. Расчеты для совпадающих следов показали, что в этом случае максимум ФВК наилучшим образом характеризует степень сходства изображений следов патронного упора.

В соответствии с данной методикой было проанализировано 34 пары совпадающих следов и 47 пар несовпадающих следов. Максимальные значения функции взаимной корреляции для произвольно выбранных 20 пар совпадающих следов представлены в Табл. 1, а для 20 пар несовпадающих следов в Табл. 2.

Из таблиц видно, что множества максимальных значений ФВК для совпадающих и несовпадающих следов частично перекрываются. При этом максимум ФВК для несовпадающих следов не превышает 0.5. Однако если за критерий



Табл. 1. Парные изображения

№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции
1	0,5575	6	0,6466	11	0,6291	16	0,4998
2	0,5489	7	0,5468	12	0,5986	17	0,3962
3	0,7338	8	0,5812	13	0,5855	18	0,4597
4	0,3869	9	0,5982	14	0,4320	19	0,5739
5	0,6370	10	0,4461	15	0,3233	20	0,7096

Табл. 2. Непарные изображения

№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции	№	Коэффициент корреляции
1	0,0629	6	0,1430	11	0,0642	16	0,1081
2	0,1577	7	0,1793	12	0,0968	17	0,0931
3	0,1194	8	0,0476	13	0,1786	18	0,1048
4	0,0925	9	0,1635	14	0,0649	19	0,1081
5	0,0968	10	0,3520	15	0,3747	20	0,1620

относимости к категории «совпадающие следы» принять значение максимума ФВК равное 0.5, то около 25 % совпадающих следов будет пропущено. Поэтому следует ввести дополнительный признак схожести следов, которым является наличие или отсутствие кластера положений ячеек с максимальным значением коэффициентов корреляции на диаграмме сдвигов.

## 2. Определение критериев отнесения сравниваемых следов к категории «совпадающие»

**Оценка коэффициента правдоподобия для совпадающих и несовпадающих следов патронного упора.** Для каждой сравниваемой пары совпадающих и несовпадающих следов было определено наибольшее число ячеек ( $W$ ) с максимальным значением коэффициента корреляции  $R$ , входящих в область маски  $Q$ . На их основании была определена частота встречаемости  $i$  максимумов коэффициентов корреляции ( $f_i$ ) для совпадающих и несовпадающих следов (Табл. 3).

$$f_i = n_i / N \quad \sum_{i=0}^M f_i = 1$$

где  $n_i$  – количество реализаций с наибольшим числом максимумов, равным  $i$ ;  $N$  – общее число

сравниваемых пар совпадающих или несовпадающих следов;  $M$  – число возможных вариантов исходов.

В связи с ограниченным числом экспериментов, по оси абсцисс выбрана единица измерения (бин), равная 3-м максимумам, а нулевое значение  $i$  равно 6 максимумам, поскольку это наименьшее возможное значение  $W$ , которое можно обнаружить с помощью предлагаемой маски. Например, если  $i=2$ , то наибольшее число максимумов равняется 12 ( $6+2*3$ ), если  $i=4$ , то это соответствует 18 максимумам ( $6+4*3$ ). Данное разбиение позволяет по ограниченному числу экспериментов получить достаточно корректную гистограмму  $f_i$  (Табл. 3). В таблице и далее по тексту индексы «KM» обозначают заведомо совпадающие следы, а «KNM» – заведомо несовпадающие следы.

Плотность вероятности  $P_i$  описывается биномиальным распределением [11; 12]:

$$\begin{aligned} P_{i(KM)} &= (\lambda_{KM}^i * e^{-\lambda_{KM}}) / i! \\ P_{i(KNM)} &= (\lambda_{KNM}^i * e^{-\lambda_{KNM}}) / i!, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\lambda$  – математическое ожидание или среднее значение максимального числа максимумов;  $i$  – число максимумов.

Табл. 3. Частота встречаемости наибольшего числа максимумов при анализе совпадающих и несовпадающих следов

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{i(KNM)}$	0.02	0.25	0.4	0.23	0.06	0.02	0	0	0	0	0
$f_{i(KM)}$	0	0	0.088	0.17	0.17	0.15	0.15	0.15	0.06	0.03	0.03

$$\begin{aligned} \lambda_{KNM} &= \sum_0^{10} i * f_{i(KNM)} \\ \lambda_{KM} &= \sum_0^{10} i * f_{i(KM)} \end{aligned} \quad (8)$$

Расчеты по формуле (8) показали, что для совпадающих следов  $\lambda_{KM}=5.11$ , а для несовпадающих следов  $\lambda_{KNM}=2.08$ . В соответствии с выражениями (7) были построены биномиальные распределения для совпадающих и несовпадающих следов (Рис. 13), а также рассчитаны коэффициенты правдоподобия для совпадающих ( $L_{KM}$ ) и несовпадающих ( $L_{KNM}$ ) следов в соответствии с формулами (9):

$$\begin{aligned} L_{KNM} &= P_{i(KNM)} / P_{i(KM)} \\ L_{KM} &= P_{i(KM)} / P_{i(KNM)} \end{aligned} \quad (9)$$

По формулам (9) были построены кривые коэффициентов правдоподобия для совпадающих и несовпадающих следов ( $L_{KNM}$  и  $L_{KM}$ ), которые представлены на Рис. 14.

**Критерии отнесения сравниваемых следов к категории «совпадающие».** Из последнего Рисунка видно, что в качестве критериев разделения следов на категории «несовпадающие» и «совпадающие» по значению  $i$  можно взять числа 12 и 21 соответственно для случая, когда число пригодных к корреляции пар ячеек порядка 45-47 или 25% и 45% от общего числа пригодных к корреляции пар ячеек. Коэффициенты правдоподобия  $L_{KNM}$  и  $L_{KM}$  для них равны 3.4 и 4.25 соответственно. Действительно, если под маской наибольшее число пар ячеек (максимумов) менее 12 (25% от их общего числа), то коэффициент правдоподобия для несовпадающих следов достаточно значимый и с большой вероятностью можно считать, что следы относятся к категории «несовпадаю-

щие». Если число пар ячеек более 21 (более 45% от их общего числа), то утверждение, что следы совпадающие, намного более вероятно, чем утверждение, что они несовпадающие.

Таким образом, показано, что сходство изображений следов патронного упора характеризуется двумя параметрами: максимальным значением ФВК изображений сравниваемых следов; числом максимумов ( $W$ ). Анализ результатов исследований позволяет сформулировать следующий критерий отнесения следов к совпадающим: максимум ФВК должен быть не менее 0.45, а  $W$  должно составлять не менее 45 % от общего числа максимумов коэффициента корреляции для парных ячеек пригодных к корреляции.

Следует отметить, что корреляционный анализ носит интегральный характер и не позволяет выявлять индивидуализирующие особенности строения исследуемых следов (разрывы, утолщения-утончения и т.д.). Поэтому отнесение следов к категории «совпадающие», в данном случае, указывает только на совпадение следовых картин, но не на факт их тождественности, т.е., на то, что исследуемые гильзы были стреляны в одном экземпляре оружия.

Данный метод может найти применение при проведении проверок по электронным базам изображений следов патронного упора с целью автоматической фильтрации следов, явно не совпадающих с исследуемым. В целом это позволит существенно сократить время проведения проверок изображений следов огнестрельного оружия на стреляных гильзах, изъятых на месте преступления, по электронным базам данных, включаю-

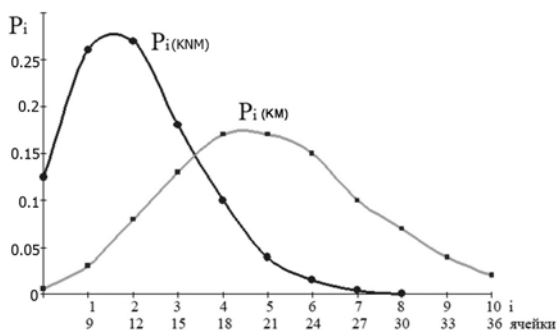


Рис. 13. Вероятность обнаружения наибольшего числа  $i$  максимумов (числа парных ячеек с максимальным значением коэффициента корреляции) при анализе совпадающих и несовпадающих следов

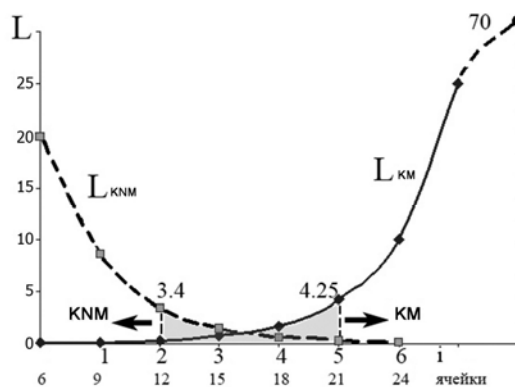


Рис. 14. Коэффициенты правдоподобия для совпадающих и несовпадающих следов

щих десятки тысяч однотипных изображений. Для этого наряду с базой данных полноценных изображений следов, отобразившихся на донной поверхности гильз, предлагается формировать базу данных этих же следов с уже удаленными областями, не содержащими информации о следах патронного упора.

Работа представляет интерес для разработчиков программного обеспечения автоматизированных баллистических идентификационных комплексов, а также экспертов, специализирующихся в области идентификации огнестрельного оружия.

## Заключение

1. Разработанный метод отличается от метода конгруэнтных совпадающих ячеек тем, что все анализируемые изображения разбиваются на одну сеть ячеек, для каждой пары ячеек пригодных к корреляции находится максимум коэффициента корреляции при различных сдвигах исследуемого изображения относительно начального положения, вводится дополнительный признак схожести следов, представляющий собой кластерный характер распределения максимумов коэффициентов корреляции парных ячеек на диаграмме сдвигов. Кроме этого, из корреляционного анализа исключаются области объемной маркировки, следы производственной обработки поверхности капсюля, а также области, не содержащие яркостных неоднородностей.

2. Исключение областей изображений со следами объемной маркировки, следов производственной обработки поверхности капсюля, а также областей, не содержащих яркостных неоднородностей, позволяет повысить чувствительность корреляционного анализа.

3. Показано, что одним из признаков схожести следов патронного упора, наряду с максимумом функции взаимной корреляции, является кластерный характер распределения максимальных значений коэффициента корреляции на диаграмме сдвигов.

4. Построены кривые коэффициентов правдоподобия для совпадающих и различающихся следов, на их основе определены критерии от-

несения сравниваемых следов к категории «совпадающие» или «несовпадающие».

5. Определены критерии отнесения следов к категории «совпадающие»: максимум ФВК должен быть не менее 0,45, а число  $W$  корреляционных ячеек с максимальным значением коэффициентов корреляции должно составлять не менее 45 % от их общего числа.

## Литература

1. Song J. 2013. Proposed "NIST Ballistics Identification System (NBIS)" Based on 3D Topographic Measurements on Correlation Cells. *AFTE Journal*. 45(2):184-194.
2. Song J. 2015. Proposed "Congruent Matching Cells (CMC)" Method for Ballistic Identification and Error Rate Estimation. *AFTE Journal*. 47(3):177-185.
3. Nichols R. 2018. Firearm and toolmark identification: the scientific reliability of the forensic science discipline. London: Academic Press. 170 p.
4. Федоренко В. А., Гвоздков С. Н., Грабовец Е. Е. Влияние неоднородностей поверхности капсюлей на вариативность статических следов бойков // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право*. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 202–207.
5. Song J., Vorburget T. V., Chua W., Yenb J., Soonsa J. A. 2018. Estimating error rates for firearm evidence identifications in forensic science. *Forensic Science International*. 284:15-32.
6. Кокин А. В., Ярмак К. В. Судебная баллистика и судебно-баллистическая экспертиза : учебник. М. : Юнити-Дана, 2015. 351 с.
7. Области применения технологии «ПОИСК» и задачи баллистической экспертизы, решаемые с помощью данной технологии [Электронный ресурс] // SBC : [сайт]. [2013]. URL: <http://www.sbc-spb.com> (дата обращения: 01.07.2019).
8. BRASSTRAX. The fastest, most accurate way to acquire cartridge case evidence. Available at: <https://www.ultraforensictechnology.com/en/our-products/ballistic-identification/brasstrax.htm> (accessed July 1, 2019).
9. Федоренко В. А., Корнилов М. В. Оценка схожести следов бойков огнестрельного оружия по их цифровым изображениям // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2015. № 3. С. 16-24.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. 2009. *Digital Image Processing Using MATLAB*. London: Gatesmark Publishing. 827 p.
11. Zalewski E. N. 2015. *Mathematics in Forensic Firearm Examination*. Syracuse: Syracuse University SURFACE. 72 p.
12. Aitken C. G. G., Taroni F. *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists*. 2004. New York: Wiley. 540 p.

**Сорокина Ксения Олеговна.** Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (СГТУ), г. Саратов, Россия. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Количество печатных работ: 3. Область научных интересов: математическое моделирование, судебная баллистика, информационные технологии. E-mail: lorredos@gmail.com

**Федоренко Владимир Александрович.** Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), учебно-научная лаборатория криминалистического материаловедения. Заведующий лабораторией, г. Саратов, Россия. К.ф.-м.н., 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.ru

**Гиверт 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

## Evaluation of the Similarity of Images of Breech Face Marks Using the Method of Correlation Cells

K. O. Sorokina<sup>1</sup>, V. A. Fedorenko<sup>II</sup>, P. V. Giverts<sup>III</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

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

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

**Abstract.** The comparison of cartridge cases is required in the course of criminal investigations of cases associated with illegal use of firearms. Lately, have been developed a few methods of forensic investigation of the marks presented on the digital images of discharged cartridge cases. However, it is essential to improve the quality of the comparison of the marks presented on digital images. The aim of the research is development of a more effective method for evaluation of the similarity of marks presented on the primers surface of cartridge cases and produced by the breech face of the weapon. The paper presents a new method of correlation cells. According to the method the investigated images are divided into small cells, the areas with insufficient information are excluded from the comparison. This approach allows to improve the sensitivity of the comparison and to get the additional information about the correlation between the marks on the compared images. On the bases of the calculated likelihood ratio the criteria of matching and not-matching were defined. The presented method is intended to be used for searching similar breech face marks in the database of digital images of the cartridge cases.

**Keywords:** Correlation coefficient, autocorrelation function, digital image processing, correlation cells method, breech face marks, cluster, likelihood ratio

DOI 10.14357/20718632190301

## References

1. Song J. 2013. Proposed “NIST Ballistics Identification System (NBIS)” Based on 3D Topographic Measurements on Correlation Cells. *AFTE Journal*. 45(2):184-194.
2. Song J. 2015. Proposed “Congruent Matching Cells (CMC)” Method for Ballistic Identification and Error Rate Estimation. *AFTE Journal*. 47(3):177-185.
3. Nichols R. 2018. *Firearm and toolmark identification: the scientific reliability of the forensic science discipline*. London: Academic Press. 170 p.
4. Fedorenko V. A., Gvozdkov S. N., Grabovec E. E. 2018. Vliyaniye neodnorodnostey poverhnosti kapsyulej na variativnost' staticheskikh sledov bojkov [Influence of Inhomogeneities of the Surface of Caps on Variability of Static Firing Pin Traces]. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Economics. Management. Law*. 18(2):202–207.
5. Song J., Vorburger T. V., Chua W., Yenb J., Soonsa J. A. 2018. Estimating error rates for firearm evidence identifications in forensic science. *Forensic Science International*. 284:15-32.
6. Kokin A. V., Yarmak K. V. 2015. *Sudebnaya ballistika i sudebno-ballisticheskaya ekspertiza [Forensic ballistics and forensic ballistic examination. Textbook]*. Moscow: Uniti-Dana. 351 p.

7. Oblasti primeneniya tekhnologii «POISK» i zadachi ballisticheskoy ekspertizy, reshaemye s pomoshch'yu dannoj tekhnologii [The range of the POISC Technology application and the ballistic expertise issues to be solved with this Technology]. Available at: <http://www.sbc-spb.com> (accessed July 1, 2019).
8. BRASSTRAX. The fastest, most accurate way to acquire cartridge case evidence. Available at: <https://www.ultraforensictechnology.com/en/our-products/ballistic-identification/brasstrax.htm> (accessed July 1, 2019).
9. Fedorenko V. A., Kornilov M. V. 2015. Ocenka skhozhesti sledov bojkov ognestrel'nogo oruzhiya po ih cifrovym izobrazheniyam [Assessing similarities firing pin traces of firearms on their digital images]. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technology and computing systems]. 3:92–100.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. 2009. *Digital Image Processing Using MATLAB*. London: Gatesmark Publishing. 827 p.
11. Zalewski E. N. 2015. *Mathematics in Forensic Firearm Examination*. Syracuse: Syracuse University SURFACE. 72 p.
12. Aitken C. G. G., Taroni F. *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists*. 2004. New York: Wiley. 540 p.

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

**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](mailto:fed77@yandex.ru)

**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](mailto:pavel.giverts@gmail.com)