

Бинаризация изображений следов на выстреленных пулях для подсчета числа совпадающих трасс

В.А. Федоренко, Е.В. Сидак, П.В. Гиверц

Аннотация. В работе рассматривается методика бинаризации изображений следов на выстреленных пулях с целью подсчета числа совпадающих трасс в сравниваемых изображениях следов в автоматическом режиме. Предлагаются количественные критерии, в соответствии с которыми признаки могут быть отнесены к парным (совпадающим). Бинаризация основана на построении по столбцам матрицы изображения кривой средней яркости. Сравнение числа парных трасс, подсчитанных экспертом на основе анализа исходных изображений, с числом парных трасс, определенных в соответствии с предложенной методикой показало, что они отличаются не более чем на 15%. Статистические данные получены на основе анализа 10 парных следов с различной степенью выраженности трасс. Исследования показали эффективность предложенного метода бинаризации и подсчета числа совпадающих трасс. Результаты исследований могут быть полезны для разработчиков программного обеспечения автоматизированных баллистических идентификационных систем.

Ключевые слова: изображения следов, выстреленная пуля, совпадающие трассы, парные следы, фильтр Фурье, приоритетный список.

Введение

При исследовании пули, изъятой с места применения огнестрельного оружия, перед экспертом баллистом ставится задача установления экземпляра оружия, из которого был произведен криминальный выстрел. Для этого эксперт сравнивает микроследы, оставленные каналом ствола на пуле, изъятой с места происшествия, с аналогичными следами на пулях из тестового массива, который может включать от нескольких десятков до нескольких тысяч однотипных объектов. В работе исследуются следы, образованные на выстреленной пуле полями нарезов, которые часто называются вторичными следами. Они представляют собой наборы трасс разной ширины и с разным профилем, расположенных на поверхности пули под углом к продольной оси пули, равным углу наклона нарезов (Рис. 1 а, б).

В настоящее время широко применяются автоматизированные баллистические идентификационные системы, позволяющие проводить проверки по большим массивам цифровых изображений следов на выстреленных пулях. Для повышения эффективности проверок необходимо корректно формировать приоритетный список сравниваемых изображений по степени их подобия. Обычно в качестве коэффициента подобия используют максимум функции взаимной корреляции сравниваемых следов. Чем больше максимум, тем на более высокое место в приоритетном списке ставится след из тестового массива [1]. Однако исходные изображения следов, представляющие собой наборы трасс, часто характеризуются неравномерной освещенностью, наличием различных пространственных шумов и артефактов, что снижает эффективность применения функции кор-



Рис.1. След от поля нареза канала ствола на выстреленной пуле

а – расположение и ориентация вторичных следов на выстреленной пуле отмечено стрелкой
б – увеличенное цифровое изображение фрагмента вторичного следа на пуле

реляции. В работе [2] показано, что более корректным является вероятностный подход, основанный на подсчете числа совпадающих трасс и общего числа трасс в сравниваемых следах.

Реализация вероятностной модели построения приоритетного списка возможна при обеспечении автоматического подсчета числа совпадающих трасс в сравниваемых следах. Для этого следует решить две задачи: разработать метод бинаризации исходных изображений динамических следов, позволяющий получать бинарные изображения с минимальным искажением ширины трасс; определить количественные критерии отнесения признаков к парным (совпадающим), которые можно будет внести в программу подсчета числа совпадающих трасс.

В работе А. Биазотти [3] при сравнении динамических следов трассы считаются совмещенными, если они точно совпали как по ширине, так и по положению в следе (Рис. 2). Практика показывает, что данные требования являются излишне строгими и не всегда выполняются для заведомо парных трасс.

В качестве примера на Рис. 3 а, б, представлены изображения вторичных парных следов

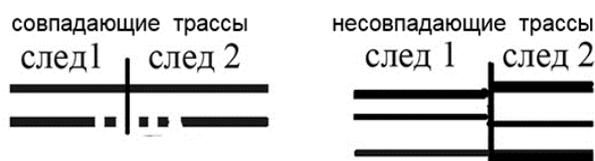


Рис.2. Совпадающие и несовпадающие трассы по А. Биазотти [1]

(сформированных одним полем нареза), совмещенные на криминалистическом микроскопе сравнения (МСК). Следы и осветители в левом и правом канале микроскопа установлены одинаковым образом. Однако видно, что некоторые совпадающие признаки отличаются по ширине (на рисунке эти признаки выделены светлыми линиями).

В работе А.Г. Грановского [4] отмечается, что парные признаки могут несколько отличаться друг от друга по ширине, по крайней мере, в пределах ширины самой узкой трассы, отобразившейся на изображении. Исходя из этого, можно предположить, что центры таких трасс могут быть смещены друг относительно друга на некоторую величину. Физическая вариативность парных признаков обусловлена

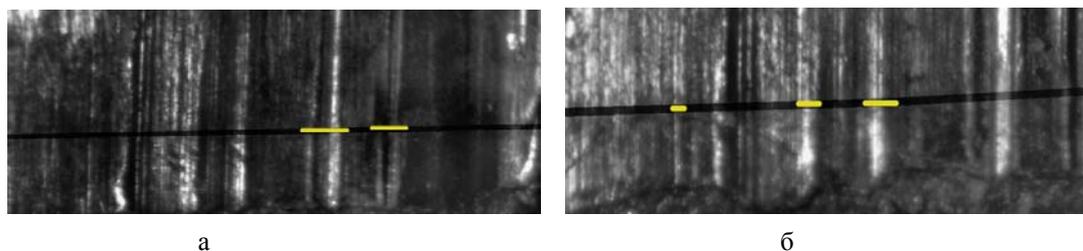


Рис. 3. Совпадающие трассы разной ширины в парных вторичных следах отмечены светлой полосой (увеличение x72)

различной силой взаимодействия пульс с одним и тем же участком канала ствола при разных выстрелах.

Таким образом, различными авторами предлагаются взаимно противоречивые критерии отнесения трасс к категории «совпадающие» или «парные». Для корректного подсчета парных трасс в автоматическом режиме исходные изображения необходимо перевести в бинарный вид и уже для них сформировать критерии отнесения трасс к совпадающим.

1. Бинаризация исходных изображений

Применение стандартных методов бинаризации изображений, основанных на использовании глобального [5] или адаптивного порога бинаризации, например, метода Ниблека [6], не привело к удовлетворительному результату. Поэтому для выделения в явном виде трасс на малоконтрастных изображениях был разработан метод, позволяющий получать бинарные изображения с малыми искажениями трасс по ширине, не влияющими на информационную значимость следов. Поскольку динамический след представляет собой последовательность полос разной яркости, был предложен метод бинаризации, основанный на построении кривой средней яркости по столбцам изображения с последующим ее сечением на некоторой высоте.

Сначала исходные изображения вторичных следов (следов полей нарезов) поворачивали на угол наклона нарезов, чтобы трассы на изображениях располагались вертикально (Рис. 4 а). Изображения с такой ориентацией структурных элементов более удобны для последующей цифровой обработки предложенным методом. Суть метода заключается в следующем. Пусть исходное изображение следа представлено в градациях серого в виде матрицы A , состоящей из M строк и N столбцов:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & & a_{2,N} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{M,1} & a_{M,2} & & a_{M,N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где каждый элемент этой матрицы $a_{i,j}$ - элемент изображения или пиксель имеет некоторое значение, определяющее яркость изображения в данном пикселе. В анализируемых изображениях значение яркости меняется в диапазоне от 0 до 255. Кривая средней яркости по столбцам изображения $H(j)$ получалась путем расчета среднего арифметического $H_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_{i,j}$ в каждом столбце изображения (j - порядковый номер столбца матрицы изображения). Кривая $H(j)$, отражающая профиль яркости изображения, нормировалась на количество строк в изображении, умноженное на 255. В местах положения трасс на кривой наблюдались локальные максимумы яркости (Рис. 4, б).

Для подавления высокочастотных пространственных шумов к кривой яркости $H(j)$ применялся фильтр Фурье нижних частот. Сначала к кривой $H(j)$ применялось прямое преобразование Фурье:

$$S(f_k) = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N H(j) e^{-i2\pi f_k j}, \quad (2)$$

где: i - мнимая единица; N - число столбцов; $f_k = k \cdot \Delta f$ - дискретная частота обратно пропорциональная числу пикселей [пс^{-1}] в строке изображения; $\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta j}$ - спектральное разрешение; Δj - пространственное разрешение изображения, равное 1 пикселю; k - номер гармоники; $S(f_k)$ - Фурье-образ сигнала $H(j)$ в частотной области.

Значения $S(f_k)$ для всех f_k , превышающих частоту отсечки $f_{\text{отс}}$, обнулялись. Далее, к $S(f_k)$ применялось обратное преобразование Фурье и таким образом формировалась сглаженная кривая яркости:

$$H^*(j) = \sum_{k=1}^{f_{\text{отс}}} S(f_k) e^{i2\pi f_k j}, \quad (3)$$

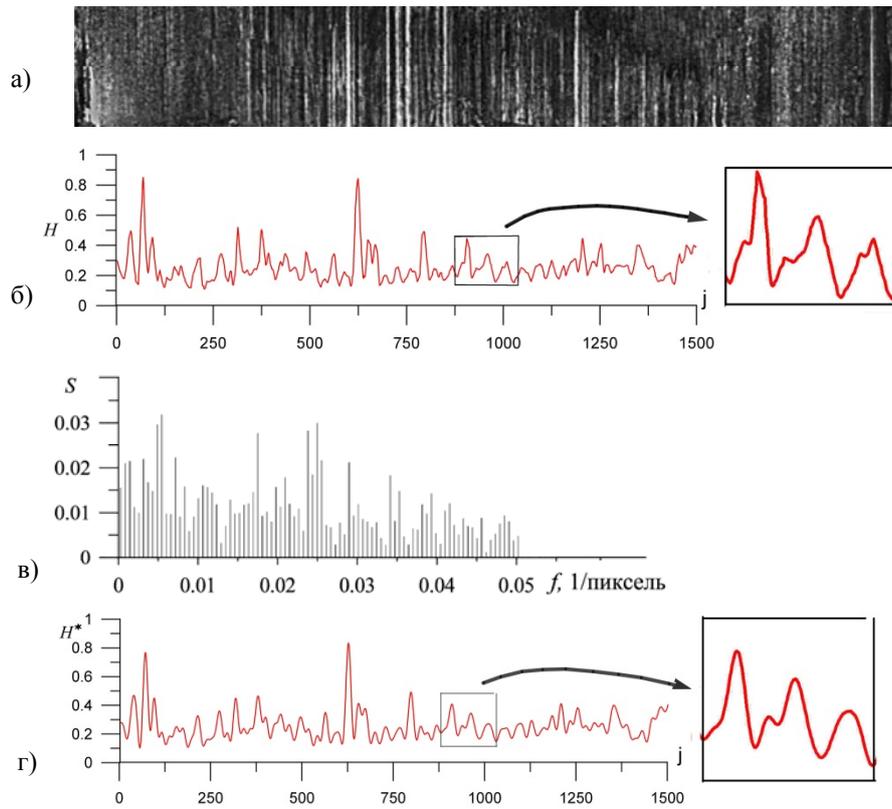


Рис. 4. Низкочастотная Фурье фильтрация кривой средней яркости

- а – исходное изображение вторичного следа с вертикально ориентированными трассами;
- б – кривая средней яркости по столбцам изображения;
- в – НЧ спектр Фурье исходного изображения с частотой отсечки 0.05 пс^{-1} ;
- г – сглаженная кривая средней яркости по столбцам изображения после применения НЧ фильтра Фурье

В результате преобразования формируется кривая яркости $H^*(j)$, в которой отсутствуют гармонические составляющие с высокими частотами, соответствующими случайному шуму. Частота отсечки определялась значением частоты, при котором относительная величина энергии, теряемой за счет низкочастотной (НЧ) фильтрации не превышает эмпирически подобранного значения 10% от всей энергии спектра Фурье (4):

$$\left[\sum_{k=1}^M S^2(f_k) - \sum_{k=1}^{f_{omc}} S^2(f_k) \right] / \sum_{k=1}^M S^2(f_k) \leq 0.1 \quad (4)$$

где M - число гармоник, определяемое длиной ряда как $N/2$.

Значение полной энергии спектра Фурье определялось суммированием квадратов спек-

тральных составляющих $S(f_k)$ на частотном интервале от $f_1=1 \cdot \Delta f$ до $f_M=M \cdot \Delta f$. В результате, подавление шумов предложенным способом позволило сохранить частотные составляющие кривой $H(j)$, обусловленные информативными трассами-признаками.

На Рис. 4 в представлен спектр Фурье с частотой отсечки, а на Рис. 4 г сглаженная кривая средней яркости по столбцам изображения. Применение НЧ фильтра Фурье позволяет в последующем исключить формирование ложных трасс шириной 1-2 пикселя, обусловленных присутствием шумовых точек на исходном изображении.

Для бинаризации изображения на кривой яркости находились координаты локальных максимумов Z_{\max}^k и локальных минимумов Z_{\min}^k . Для каждого локального максимума определялся

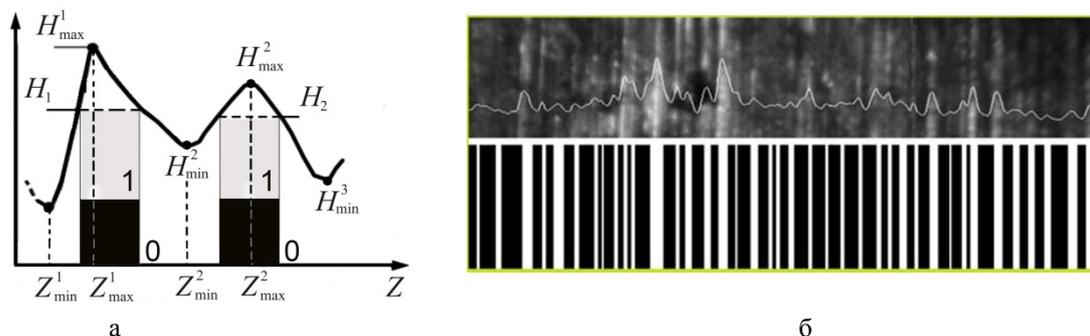


Рис. 5. Преобразование исходного изображения, представленного в градациях серого, в бинарный вид
 а – схема формирования бинарного изображения динамического следа по кривой яркости;
 б – исходное изображение следа с кривой средней яркости (сверху), исходное изображение в бинарном виде (снизу)

свой порог бинаризации по уровню яркости H_k . Для этого находилась координата ближайшего к нему по яркости соседнего минимума $Z_{min}^{k*} = \max(Z_{min}^k, Z_{min}^{k+1})$, порог рассчитывался как срединное значение между значениями яркости в точках Z_{max}^k и Z_{min}^{k*} (Рис. 5, а):

$$\begin{aligned} H_1 &= (H(Z_{max}^1) - H(Z_{min}^{1*})) / 2 + H(Z_{min}^{1*}); \\ H_2 &= (H(Z_{max}^2) - H(Z_{min}^{2*})) / 2 + H(Z_{min}^{2*}); \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Всем пикселям изображения $a_{i,j}$ в диапазоне $[Z_{min}^k; Z_{min}^{k+1}]$, яркость которых превышает H_k , присваивалось значение равное 1 (признак), остальные пиксели считались фоном со значением яркости, равным нулю (Рис. 5, а). Локальные максимумы на нормированной кривой $H(j)$, не превышающие ближайший минимум более чем на 0.1, исключались из рассмотрения и всем пикселям $a_{i,j}$, лежащим в окрестности данного максимума, присваивалось значение равное 0 (фон). Пороговое значение 0.1 было определено экспериментально. Оно позволяет исключить из процесса построения трасс локальные максимумы, обусловленные присутствием на исходных изображениях артефактов в виде отдельных мелких светлых пятен.

Применение данного метода позволяет преобразовать исходные изображения, представленные в градациях серого, в бинарные с незначительными искажениями трасс по ширине (Рис. 5, б) с сохранением идентификационной значимости следов.

2. Критерии отнесения трасс к «совпадающим»

Изображения парных трасс на бинарных изображениях могут отличаться не только из-за того, что на исходных изображениях они имели несколько разную ширину, но и из-за самого метода бинаризации. Например, они могут отличаться из-за неидентичности формы максимумов кривой яркости, соответствующих данным трассам. На Рис. 6 (а, б) представлены локальные максимумы кривых яркости, имеющие одну ширину и одно положение центров. Сечение кривой яркости на высоте h (в данном случае на $1/2$ высоты максимума) может привести к формированию парных трасс с некоторым сдвигом (Рис. 6 а) и с разной шириной (Рис. 6 б). Поэтому с учетом данных явлений необходимо определить условия, при выполнении которых трассы могут считаться парными (условие совпадения групповых признаков оружия, отобразившихся в следах, считается выполненным).

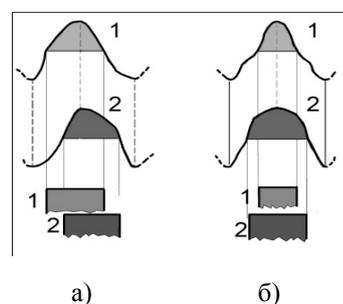


Рис.6. Отличие положений центров и ширины парных трасс на бинарных изображениях

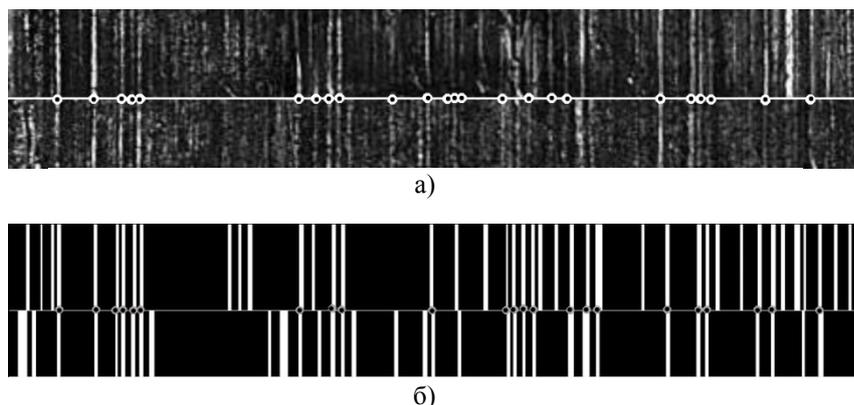


Рис. 7. Изображения совмещенных парных вторичных следов, представленных в градациях серого (24 пары совпадающих трасс) и в бинарном виде (23 пары совпадающих трасс)

Вопрос о корректности выделения трасс по исходным изображениям может быть решен методом экспертной оценки. Суть данного метода заключается в подсчете числа совпадающих трасс на исходных изображениях (в градациях серого) сравниваемы х следов опытным экспертом и подсчете парных трасс на бинарных изображениях этих же следов в соответствии с предложенными критериями. Если результаты в первом и втором случае будут близки, то разработанные критерии можно считать корректными.

Анализ бинарных изображений парных следов показал, что для отнесения трасс к категории совпадающих необходимо одновременное выполнение следующих условий:

1. значения ширин парных трасс не должны отличаться более чем в 2 раза;

2. при совмещении следов парные трассы должны совмещаться не менее чем на 50 % по ширине.

Корректность данных условий для бинарных изображений проиллюстрирована на Рис. 7 и Рис. 8. На изображениях показаны совмещенные парные следы, представленные в градациях серого. Белыми точками экспертом выделены совпадающие трассы (Рис. 7 а, Рис. 8 а). Затем в соответствии с разработанной методикой исходные изображения были преобразованы в бинарный вид и точками выделены пары трасс, удовлетворяющие сформулированным выше условиям (Рис. 7 б, Рис. 8 б). Видно, что на бинарных изображениях достаточно полно отобразились основные признаки следов. При этом число парных трасс на изображениях, представленных в градациях серого и в бинарном виде, практически совпало.

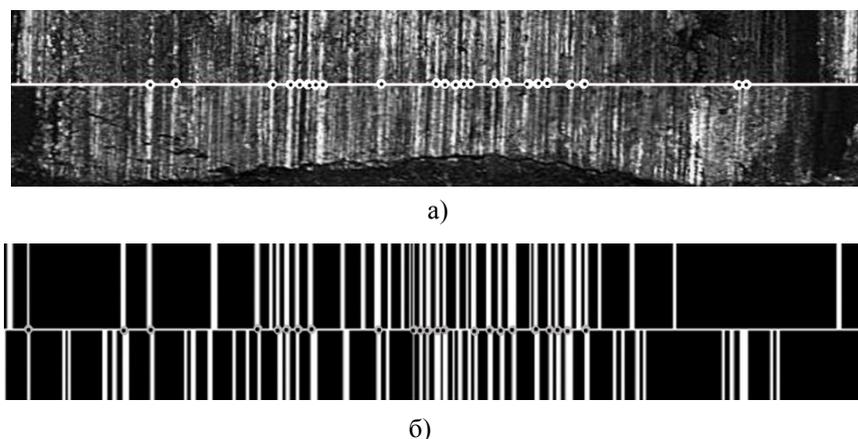


Рис.8. Изображения совмещенных парных вторичных следов
а) – изображение в градациях серого, 23 пары совпадающих трасс;
б) – изображение в бинарном виде, 23 пары совпадающих трасс

Для оценки надежности предложенного метода бинаризации были отобраны изображения более 10 парных следов с разной выраженностью трасс. Для них было подсчитано число совпадающих трасс, выделенных экспертом при анализе исходных изображений, а также выделенных в соответствии с предложенными критериями на бинарных изображениях. Число совпадающих трасс в каждом случае отличалось не более чем на 15 процентов. Таким образом, результат подсчета числа совпадающих трасс предложенным способом можно считать близким к результату анализа экспертом исходных изображений.

Следует отметить, что подсчет числа совпадающих трасс может проводиться в автоматическом или ручном режиме при реализации различных моделей оценки уникальности комплексов совпадающих признаков, в том числе, например, при реализации метода подсчета последовательно совпадающих трасс в непрерывных группах, предложенного А. Биасотти [3].

Заключение

Разработанная методика бинаризации изображений следов на выстреленных пулях позволяет преобразовать их в бинарный вид с минимальными искажениями идентификационно значимых признаков. На основе анализа бинар-

ных изображений заведомо парных следов, авторами разработаны критерии, которым должны удовлетворять совпадающие трассы. На практических примерах показано, что предложенная методика позволяет корректно выделять совпадающие трассы и может быть предложена для автоматизации процесса подсчета числа совпадающих трасс в сравниваемых динамических следах.

Литература

1. Федоренко В. А., Сидак Е. В. Обработка цифровых изображений следов на пулях для автоматической идентификации оружия // Известия Саратов. Университета, 2014, Т.14, в.1, ч.2, с. 200-205.
2. Федоренко В.А., Мыльцина О.А. Концепция математической модели Оценки уникальности наборов совпадающих трасс во вторичных следах на выстреленных пулях // Изв. Саратов. Ун-та. Нов. Сер. Экономика. Управление. Право. 2016, вып.2, с.
3. А. Biasotti. A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets // Journal Forensic Sciences, 1959, Jan; 4(1), pp. 34-50.
4. Грановский Г.Л. Вероятностная оценка пригодности линейных (динамических) следов для идентификации. Методические рекомендации для экспертов. Москва, 1985. С. 19.
5. Гансалес Р., Вудс Р. Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005.
6. Niblack W. An Introduction to Image Processing, N.J.: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986, pp.115-116.

Федоренко Владимир Александрович. Зав. лабораторией Саратовского ГУ им. Н.Г. Чернышевского. Окончил Саратовский ГУ в 1981 году. Кандидат физико-математических наук, доцент. Автор более 70 печатных работ и двух 2 монографий. Область научных интересов: судебная баллистика, идентификация огнестрельного оружия, обработка цифровых изображений. E-mail: fed77@yandex.ru

Сидак Елена Владимировна. Инженер-программист Саратовского ГУ им. Н.Г. Чернышевского. Окончила Саратовский ГУ в 2011 году. Автор 20 печатных работ. Область научных интересов: идентификация оружия, экспериментальное моделирование биологических систем, обработка цифровых изображений.

Гиверт Павел Витальевич. Баллистическая лаборатория криминалистического управления полиции Израиля. Окончил Университет имени Бен-Гуриона, Беер-Шева, Израиль в 1999 году. Автор 30 печатных работ. Область научных интересов: судебная баллистика, идентификация огнестрельного оружия. E-mail: pavel.giverts@gmail.com