



УДК 343.9

Вероятностная оценка совмещения комплексов трасс во вторичных следах на выстреленных пулях

В. А. Федоренко, Ю. В. Илясов

Федоренко Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией криминалистического материаловедения, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, fed77@yandex.ru

Илясов Юрий Владимирович, генеральный директор, СДЦ Инжиниринг, Санкт-Петербург, uv@sbc.spb.ru

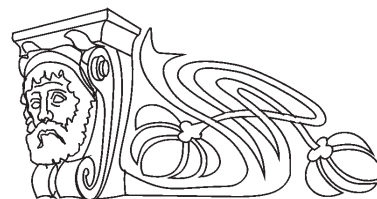
Введение. В работе анализируется эффективность применения метода последовательно совпадающих трасс (CMS метод) и вероятностного метода для обоснования категорического положительного вывода при идентификации огнестрельного оружия по следам на выстреленных пулях. **Теоретический анализ.** Рассмотрены теоретические основы CMS метода и принципы формирования на его основе критериев отнесения сравниваемых следов к категории «совпадающие». Представлен вероятностный метод, который включает две взаимно дополняющие модели. Первая модель основана на предположении, что все трассы имеют одинаковую ширину и могут занимать во вторичном следе строго определенные позиции. Вторая модель учитывает ширину трасс в сериях последовательно совпадающих трасс. **Экспериментальные исследования эффективности оценки уникальности комплексов совмещенных трасс.** Исследования проведены для вторичных следов с высокой и малой плотностью трасс. В работе исследовались следы на пулях, выстреленных из пистолета Макарова и автомата Калашникова АК-74. Для следов с малой плотностью трасс в соответствии с CMS методом были определены критерии отнесения их к категории «совпадающие». Показано, что таким критерием является формирование серии из трех или более последовательно совпадающих трасс при совмещении следов. Авторами были определены вероятностные критерии тождественности сравниваемых следов с высокой и низкой плотностью трасс. Показано, что для следов с низкой плотностью трасс критерием отнесения их к категории «совпадающие» является вероятность случайного совмещения трасс не более $5 \cdot 10^{-3}$, а для следов с высокой плотностью трасс вероятность не должна превышать 10^{-6} . **Результаты.** Показано, что вероятностный метод более эффективен при идентификации огнестрельного оружия по вторичным следам. Он позволяет количественно оценить уникальность совпадающих признаков и корректно обосновывать категорический положительный вывод при идентификации оружия по следам на выстреленных пулях. В данной работе не учитывается проблема формирования следов с так называемыми подгрупповыми характеристиками (subclass characteristic).

Ключевые слова: следы полей нарезов, идентификация оружия, судебная баллистика, вероятностная модель.

Поступила в редакцию: 18.11.2019 / Принята: 10.01.2020 / Опубликовано: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-221-227>



Введение

Проблема объективизации формирования категорических выводов при идентификации оружия является чрезвычайно актуальной. Например, в работе [1] указывается на необходимость разработки математических моделей, позволяющих производить количественные оценки совпадения признаков в сравниваемых следах при идентификации оружия.

В работе анализируется эффективность отнесения совмещенных вторичных следов к категории «совпадающие» методом последовательно совпадающих трасс (CMS метод) и вероятностным методом. Исследования проведены для вторичных следов с высокой и малой плотностью трасс (для следов на пулях, выстреленных из ПМ и АК-74 соответственно). При исследовании эффективности CMS метода для следов с высокой плотностью трасс использовались критерии, сформированные А. Биазотти, а для следов с малой плотностью трасс были определены новые критерии. Авторами были определены критерии отнесения сравниваемых следов с высокой и низкой плотностью трасс к категории «совпадающие» при использовании вероятностного метода.

Теоретический анализ

Метод последовательно совпадающих трасс (CMS метод). CMS метод основан на подсчете серий с максимальным числом последовательно совпадающих трасс в сравниваемых следах [2, 3]. Исходом сравнения любой пары следов (как совпадающих, так и несовпадающих) является максимальная серия последовательно совпадающих трасс. Такая серия может состоять из 1, 2, ..., n трасс и даже 0 трасс, если совпадающие трассы отсутствуют. Нормирующим в данном случае будет являться условие, что результатом сравнения с вероятностью, равной 1 (достоверное событие), будет исход, представляющий максимальную серию, состоящую из 0, или 1, или 2, ..., n трасс.

Суть CMS метода заключается в следующем. Анализируемые следы совмещаются оптимальным образом. Далее определяется частота появления максимальных серий с числом трасс 0, 1, 2,



..., n в заведомо совпадающих и несовпадающих следах. Далее на основе проведенного анализа по достаточно большой выборке сравниваемых следов строится распределение Пуассона уже для бесконечного числа реализаций. Распределение позволяет рассчитать вероятность очень редкого события без проведения огромного числа экспериментов для подтверждения его реализации. Например, было исследовано 200 пар следов, получены данные для серий с $i = 0, 1, 2, \dots, 8$. Серия из 10 трасс ни разу не выпала в 200 экспериментах. Однако построенное по результатам исследования распределение Пуассона позволяет достаточно точно оценить вероятность такого события.

Таким образом, по предельному распределению определяются вероятности формирования максимальных серий длиной i для заведомо совпадающих и заведомо несовпадающих следов ($P(i)_{KM}$ и $P(i)_{KNM}$ соответственно). Далее строятся зависимости коэффициента правдоподобия L_{KM} и L_{KNM} (1) от числа трасс максимальной серии для гипотез, что сравниваемые следы являются совпадающими или несовпадающими соответственно

$$L_{KM} = \frac{P(i)_{KM}}{P(i)_{KNM}}, \tag{1}$$

$$L_{KNM} = \frac{P(i)_{KNM}}{P(i)_{KM}}.$$

Например, по кривым коэффициентов правдоподобия, представленным на рис. 1, можно определить длину серии (в данном случае серия включает 8 трасс), при которой гипотеза, что совмещенные следы являются совпадающими, будет намного более вероятной, чем гипотеза, что следы не являются совпадающими.

К основным недостаткам CMS методики можно отнести следующие:

- учитываются только серии с максимальным числом трасс при построении функции распределения, так как в противном случае невозможно будет провести нормировку;
- не учитывается общее число совпавших трасс и число трасс в сравниваемых следах.

Вероятностный метод оценки уникальности комплексов совмещенных трасс. Данный метод достаточно подробно изложен в ряде публикаций [4, 5], поэтому рассмотрим его кратко. Метод основан на двух взаимно дополняющих моделях.

Первая модель опирается на следующие предположения: каждая трасса во вторичном

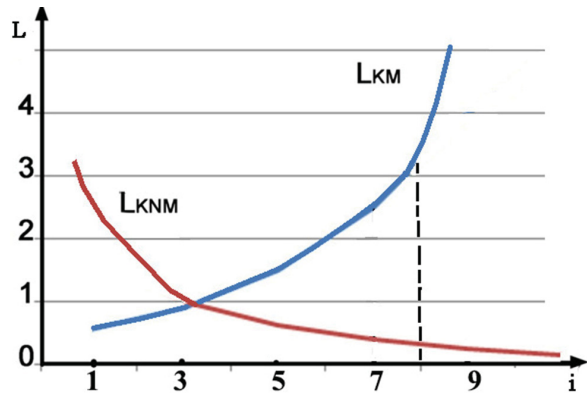


Рис. 1. Коэффициенты правдоподобия для заведомо совпадающих (KM) и заведомо не совпадающих (KNM) следов в зависимости от числа трасс максимальной серии, i – максимальное число трасс в сериях

Fig. 1. Likelihood coefficients for known matching (KM) and known non-matching (KNM) tracks depending on the number of tracks of the maximum series, i – the maximum number of tracks in the series

следе может занимать строго определенную позицию; все трассы имеют среднюю ширину 20–25 мкм. Исследования были проведены для вторичных следов, которые имеют четко обозначенные границы в виде отпечатка холостой и боевой грани (рис. 2). Расчеты вероятности проводили в соответствии со стандартной формулой (2) для гипергеометрической вероятности [4]:

$$P_{in} = \left\{ \sum_{i=n}^{\min(N_1, N_2)} \frac{C_{N_1}^i C_{N-N_1}^{N_2-n}}{C_N^{N_2}} \right\}, \tag{2}$$

где N_1 – количество трасс в первом следе; N_2 – количество трасс во втором следе; n – общее число совпадающих трасс; i – текущее значение от номера n до минимального значения из N_1, N_2 ($\min(N_1, N_2)$); N – количество возможных позиций (например, для 9 мм пули, выстреленной из пистолета Макарова, ширина вторичных следов порядка 2.3–2.4 мм, соответственно $N=100$); $N-N_1$ – число позиций первого следа, на которые могут попасть непарные трассы второго следа; N_2-n – число непарных трасс второго следа; $C_{N-N_1}^{N_2-n}$ – число сочетаний непарных трасс второго следа по числу позиций, которые они могут занимать; $C_{N_1}^i$ – число сочетаний по i из N_1 ; $C_N^{N_2}$ – число сочетаний по N_2 из N .

Данная модель достаточно корректно позволяет оценить вероятность случайного совмещения трасс для следов, включающих малое или среднее

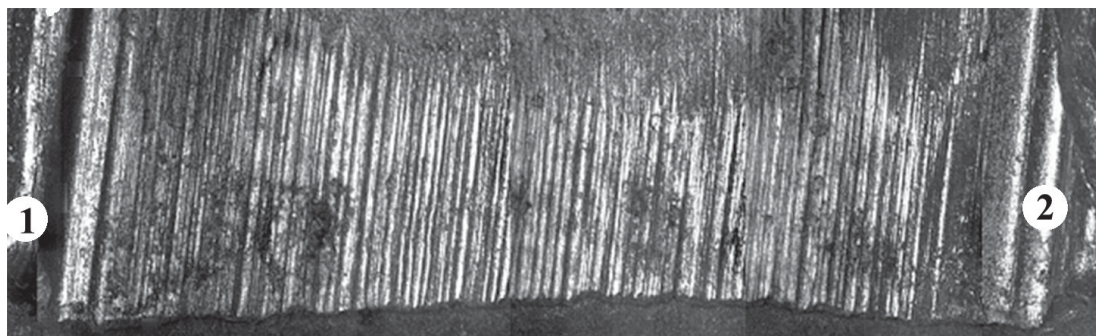


Рис. 2. Нижняя часть вторичного следа: 1 – след холостой грани; 2 – след боевой грани

Fig. 2. The lower part of the secondary trace: 1 – track of a blank cut edge; 2 – track of the battle cut edge

число трасс. В случае если исследуются следы с высокой плотностью трасс, значение вероятности случайного совмещения комплекса трасс получается явно завышенным. Например, в следах на пулях, выстреленных из пистолета Макарова, содержится по 80 трасс (из 100 возможных), и при этом совпало 70 трасс. На первый взгляд, сложилась довольно уникальная ситуация, однако для данной модели 60 трасс должно совпасть с вероятностью, равной 1, при любом их распределении в следах. Поэтому уникальность события будут определять оставшиеся 10 совпадающих трасс. На практике же при совмещении более 50% трасс на основе практического опыта у эксперта формируется вполне обоснованное внутреннее убеждение о наличии криминалистического тождества одному экземпляру оружия у исследуемых следов. В дальнейшем в работе такие пары следов для краткости будем называть криминалистически тождественными, понимая под этим наличие у них уникальной совокупности совпадающих признаков.

Таким образом, несмотря на то, что в предложенной модели учитывается число трасс в каждом следе и число совпадающих трасс, результат расчетов нельзя признать удовлетворительным, поскольку не учитывается важная идентификационная информация, а именно структура совпадающих трасс, которую можно выразить через их ширину. Действительно, при сравнении следов эксперт учитывает не только совмещение центров трасс, но и совпадение ширины совмещаемых трасс (в некоторых пределах).

Вторая модель учитывает ширину совпадающих трасс в сериях. Серии можно рассматривать как статистические множества, единые для сравниваемых следов. В первой модели таким условием было обеспечение одной ширины сравниваемых следов и, соответственно, одинаковое для них (следов) максимально возможное число

трасс. Во второй модели таким единым статистическим параметром является каждая серия, которая характерна для обоих сравниваемых следов.

Предположим, что трассы во вторичных следах условно можно разделить по ширине на 3 четко дифференцируемых диапазона. Пусть имеется серия из k подряд совпадающих трасс, причем пусть r_1 – число трасс в этой серии с шириной, относящейся к первому диапазону, r_2 – число трасс с шириной второго диапазона и r_3 – число трасс с шириной, относящейся к третьему диапазону. Вероятность случайного сочетания k трасс различной ширины в серии можно определить в соответствии со следующим выражением:

$$P = \frac{P_j(r_1, r_2, r_3)}{3^k}, \quad (3)$$

где $r_1 + r_2 + r_3 = k$; $P_j(r_1, r_2, r_3) = \frac{k!}{r_1! r_2! r_3!}$ – вероятность, определяемая количеством возможных сочетаний трасс разной ширины в серии из k трасс; j – номер серии.

Оценка вероятности по формуле (3) для серий, состоящих от 3 до 7 трасс с 3-уровневой градацией их по ширине, показала, что они характеризуются значениями вероятности следования трасс именно с такой последовательностью ширин, лежащими в диапазоне от 0.3 до 0.05. Если таких серий несколько, то вероятности перемножаются как независимые события:

$$P_l = \prod_{j=1}^m \left\{ \frac{P_j(r_1, r_2, r_3)}{3^k} \right\}, \quad (4)$$

где m – количество серий. Если ширина трасс в каждой серии будет одна, то в соответствии с формулой (3) вероятность, обусловленная второй моделью, будет равна 1, т.е. серии не повысят уникальность комплексов совпадающих признаков-трасс в сравниваемых следах.



Вторая модель позволяет достаточно корректно оценить вероятность совмещения серий с разной шириной трасс для следов с высокой плотностью трасс. В результате обобщенная модель достаточно корректно работает для следов с любой плотностью трасс. Итоговая формула оценки вероятности случайного совмещения трасс с учетом их ширины в сериях из последовательно совпадающих трасс определяется следующим выражением:

$$P_{all}(A) = \left\{ \sum_{i=n}^{\min N_1, N_2} \frac{C_{N_1}^i C_{N_2-N_1}^{N_2-n}}{C_N^{N_2}} \right\} \prod_{j=1}^m \left\{ \frac{P_j(r_1, r_2, r_3)}{3^k} \right\} \quad (5)$$

Следует отметить, что оценка вероятности случайного совпадения трасс в совмещенных следах эквивалентна оценке вероятности того, что совмещенные следы сформированы различными экземплярами оружия. Тогда величина $1-P_{all}$ соответствует вероятности того, что совмещенные следы сформированы микрорельефом одного канала ствола.

Экспериментальные исследования эффективности оценки уникальности комплексов совмещенных трасс

Исследование эффективности оценки криминалистической тождественности сравниваемых вторичных следов с низкой плотностью трасс CMS и вероятностным методами.

Для исследования следов с малым числом трасс (не более 10 в каждом следе) были отобраны пули калибра 5.45 мм, выстреленные из АК-74. Для анализа было отобрано 48 пар совпадающих вторичных следов и 66 пар несовпадающих следов, содержащих не менее двух трасс каждый. Следы, содержащие менее двух трасс, считались непригодными к идентификации и не учитывались.

Экспериментальные исследования показали, что серия из трех последовательно совмещенных трасс появилась 16 раз среди совпадающих следов и 1 раз среди несовпадающих следов. Серия же из четырех трасс ни разу не появилась во всех 114 анализируемых парах следов. В соответствии с CMS методикой критерием потенциальной тождественности исследуемого типа следов можно считать серию из трех трасс.

Для исследования возможных пропусков из набора заведомо совпадающих следов экспертом было отобрано 16 пар, тождественность которых представлялась наиболее убедительной. Применение CMS метода показало следующее:

1) из 16 пар заведомо совпадающих следов, выделенных экспертом как криминалистически тождественных, 10 оказались пропущенными;

2) было допущено одно ложное положительное утверждение при анализе несовпадающих следов (один случай формирования в несовпадающих следах серии из трех трасс).

Применение вероятностного метода к данным следам показало, что в качестве критерия криминалистической тождественности следов следует взять значение вероятности (P_{all}) случайного совмещения трасс $5 \cdot 10^{-3}$ и менее. Это означает, что с вероятностью 0.995 и более можно утверждать, что следы сформированы рельефом одного канала ствола. В этом случае из 16 пар следов, наличие уникальной совокупности совпадающих признаков у которых определено экспертом, не было пропущено ни одной пары. При этом не сделано ни одного ложного положительного утверждения. Таким образом, вероятностная методика отнесения вторичных следов на пулях, выстреленных из АК-74, к категории «совпадающие» является более эффективной. При этом вероятностная методика позволяет количественно обосновать категорический положительный вывод.

Исследование эффективности отнесения CMS и вероятностным методами сравниваемых вторичных следов с высокой плотностью трасс к категории «совпадающие».

Для экспериментальных исследований было отобрано: 33 пары заведомо совпадающих следов, криминалистическая тождественность которых у эксперта не вызывала сомнений; 33 пары совпадающих следов с относительно малым числом совпадающих трасс; 22 пары заведомо не совпадающих следов, совмещенных максимально возможным образом. По формуле (5) была проведена оценка вероятности P_{all} для каждой совмещенной пары следов из этих групп. Распределение относительной частоты встречаемости f_v в зависимости от значения P_{all} для всех трех групп следов представлено на рис. 3. Сплошной линией обозначено распределение для совпадающих и явно тождественных следов, тонкой сплошной линией – распределение для совпадающих следов с малым числом совпадающих трасс. Пунктирной линией обозначено распределение для заведомо несовпадающих следов, которые были совмещены максимально возможным образом (наблюдалось максимальное число совпадающих признаков).

Анализ кривых распределения для следов с высокой плотностью трасс показал следующее. Кривая распределения для совпадающих следов, наличие тождества у которых невозможно обосновать, схожа с кривой распределения для заведомо несовпадающих следов, но сдвинута относительно последней в сторону меньшей вероятности. В области значений вероятности

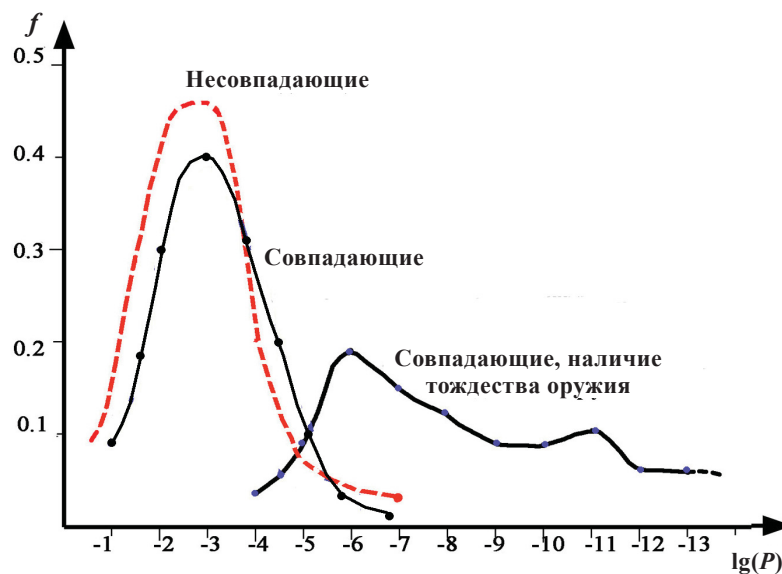


Рис. 3. Распределение относительной частоты повторяемости вероятности случайного совмещения комплексов трасс в следах с высокой плотностью трасс
 Fig. 3. Distribution of the relative frequency of occurrence of the probability of random combination of track complexes in traces with a high density of tracks

порядка 10^{-5} все три кривые пересекаются. Критерием отнесения следов с высокой плотностью трасс совмещенных оптимальным образом к категории «совпадающие» можно считать значение вероятности 10^{-6} и менее. В этом случае из 33 пар заведомо совпадающих следов первой группы к тождественным было отнесено 30 пар, три пары оказались пропущенными.

В соответствии с критериями, полученными А. Биазотти для динамических следов с высокой плотностью трасс [2], критерием отнесения совмещенных следов к категории «совпадающие» считалось присутствие в них серии из 8 и более последовательно совпадающих трасс или двух серий не менее чем из 5 трасс каждая. Анализ следов из первой группы CMS методом показал, что из

33 пар заведомо совпадающих следов было пропущено 16 и только 17 пар отнесены к совпадающим.

Таким образом, можно резюмировать, что для следов с высокой плотностью трасс вероятностный метод позволяет более корректно обосновывать формирование категорического положительного вывода, чем CMS метод.

Следует отметить, что в данной работе не учитывается проблема возможного формирования следов с так называемыми подгрупповыми характеристиками (subclass characteristic). Одна пара таких следов оказалась среди анализируемых заведомо несовпадающих следов и сформировала комплекс совпадающих признаков с достаточно высокой уникальностью (вероятность случайного совмещения комплекса

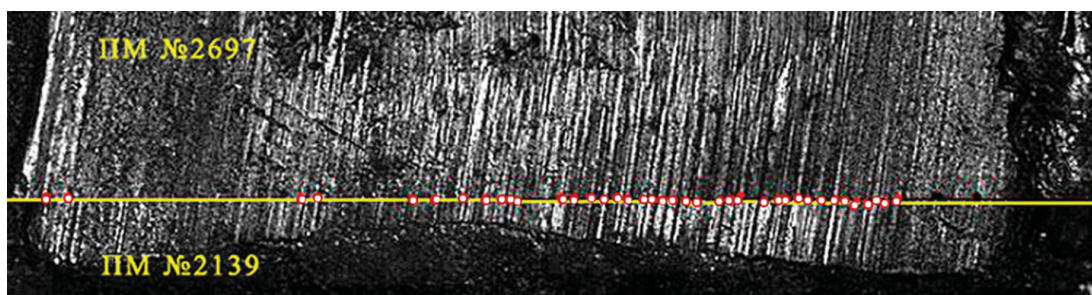


Рис. 4. Совмещенные следы с подгрупповыми характеристиками (subclass characteristic), сформированные разными экземплярами оружия (совмещенные трассы выделены точками) (цвет online)

Fig. 4. Combined traces with subgroup characteristics (subclass characteristic) formed by different weapons (combined tracks are marked with dots) (color online)



признаков порядка 10^{-7}). На рис. 4. представлено совмещение этих следов, сформированных заведомо разными экземплярами оружия. Видно, что совпала уникальная совокупность признаков, которая может привести к формированию у эксперта ложного вывода о едином источнике происхождения анализируемых следов. К сожалению, в настоящее время нет надежных способов дифференциации несовпадающих следов с одинаковыми подгрупповыми характеристиками от следов, сформированных действительно одним следообразующим объектом (каналом ствола).

Результаты

1. Вероятностный метод позволяет более корректно обосновывать категорический положительный вывод при идентификации оружия по следам на выстреленных пулях, чем CMS метод.

2. Вероятностный метод позволяет получить количественную оценку уникальности совпадающих признаков.

Список литературы

1. PCAST. Report to the President – Forensic Science in Criminal Courts : Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods. September 2016. URL: <http://www.documentcloud.org/documents/3121011-Pcast-Forensic-Science-Report-Final.html> (дата обращения: 04.02.2020).
2. Biasotti A. A. Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets // Journal Forensic Sciences. 1959. Vol. 4, № 1. P. 34–50.
3. Zalewski E. Mathematics in Forensic Firearm Examination. N. Y. : Syracuse University, 2015. 64 p.
4. Федоренко В. А., Сидак Е. В., Мильцина О. А. Методика оценки уникальности комплексов трасс, совмещенных во вторичных следах // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 217–221. DOI: 10.18500/1994-2540-2018-18-2-217-221
5. 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.

Образец для цитирования:

Федоренко В. А., Илясов Ю. В. Вероятностная оценка совмещения комплексов трасс во вторичных следах на выстреленных пулях // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-221-227>

A Probabilistic Assessment of the Complexes of Combined Traces in Secondary Tracks on Fired Bullets

V. A. Fedorenko, Yu. V. Iliassov

Vladimir A. Fedorenko, <https://orcid.org/0000-0001-5033-6694>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, fed77@yandex.ru

Yuri V. Iliassov, SBC engineering Co., Ltd, lit. A, 3B 10th Krasnoarmeiskaya St., St. Petersburg 190103, Russia, uv@sbc.spb.ru

Introduction. The paper analyzes the effectiveness of the application of the method of successively matching traces (CMS method) and the probabilistic method for substantiating the forensic identity of the overlapping secondary traces on fired bullets. **Theoretical analysis.** The theoretical foundations of the CMS method and the probabilistic method are considered. It is shown that the second method is formed on the basis of two mutually complementary probabilistic models. **Experimental studies of the effectiveness of assessing the uniqueness of the complexes of combined tracks.** The studies were conducted for secondary traces with high and low track density (for tracks on bullets fired from PM and AK-74, respectively). Potential trace identity criteria were defined for traces with low track

density according to the CMS method. The authors determined the probabilistic criteria for the identity of the compared traces with high and low track density. It is shown that for traces with a low track density, the criterion of potential identity is the probability of random alignment of tracks no more than $5 \cdot 10^{-3}$, and for traces with a high density of tracks the probability is no more than 10^{-6} . **Results.** The probabilistic method allows you to obtain a quantitative assessment of the uniqueness of coincident features and correctly substantiate a categorical positive conclusion when identifying firearms by traces on fired bullets.

Keywords: land markings, consecutively matching striations, firearms identification, forensic ballistics, probabilistic models.

Received: 18.11.2019 / Accepted: 10.01.2020 /
Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

References

1. 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 4 February 2020).



2. Biasotti A. A. Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets. *Journal Forensic Sciences*, 1959, vol. 4, no. 1, pp. 34–50.
3. Zalewski E. *Mathematics in Forensic Firearm Examination*. New York, Syracuse University, 2015. 64 p.
4. Fedorenko V. A., Sidak E. V., Myltsyna O. A. The Method of the Estimation of Uniqueness of Route Complexes in Secondary Traces. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Economics. Management. Law*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 217–221 (in Russian). DOI: 10.18500/1994-2540-2018-18-2-217-221
5. Fedorenko V. A., Navrotskaya E. V. Criteria and algorithm of the evaluation of the uniqueness of the complexes of matching tracks in the traces on the shot bullets. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Journal of Information Technologies and Computing Systems], 2019, no. 1, pp. 110–120 (in Russian).

Cite this article as:

Fedorenko V. A., Iliasov Yu. V. A Probabilistic Assessment of the Complexes of Combined Traces in Secondary Tracks on Fired Bullets. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Economics. Management. Law*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 221–227 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-221-227>
