

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭТОГРАММЫ ОЛЬФАКТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОГО ОБЪЕКТА И ОДНОГО ПРОВЕРЯЕМОГО ЛИЦА

© 2026 А.А. Солдатенко, Д.В. Семенова

Сибирский федеральный университет

(660041 Красноярск, пр. Свободный, д. 79)

E-mail: ASoldatenko@sfu-kras.ru, DVSeменова@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию: 30.12.2025

Целью исследования является разработка алгоритмов и комплекса программ составления сравнительных рядов для запаховых следов при ольфакторной экспертизе. Предложена математическая модель, основанная на теории формальных языков, для задачи построения сравнительных рядов и формирования этограммы для идентификационной ольфакторной экспертизы при проверке одного объекта и одного проверяемого лица. Этограмма — рабочая карта исследования, в которой отражаются сведения о расположении объектов сравнительных рядов и сигнальном поведении собак-детекторов. Для каждого из четырех сравнительных рядов рассматриваемой этограммы построен свой формальный язык. Формирование десятибуквенных слов каждого языка происходит согласно регламентированным требованиям, что позволяет выделить шаблоны. Шаблон определяет порядок расстановки значащих запаховых проб в каждом ряду. Математическая задача составления этограммы сводится к выбору четырех слов из соответствующих языков. Данная задача имеет комбинаторный характер с множественными ограничениями, продиктованными практической областью. Представлено описание алгоритмов и комплекса программ для решения поставленной задачи. Выполнен анализ мощности языков для каждого сравнительного ряда и проанализированы генеративные возможности алгоритма построения этограммы.

Ключевые слова: ольфакторный анализ, этограмма, формальный язык, комбинаторика, алгоритмизация.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Солдатенко А.А., Семенова Д.В. Математическая модель и алгоритмы построения этограммы ольфакторного исследования одного объекта и одного проверяемого лица // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2026. Т. 15, № 1. С. 80–95. DOI: 10.14529/cmse260104.

Введение

Органами внутренних дел России проводится множество различных видов экспертиз. Одной из них является экспертиза запаховых следов человека (ольфакторная) [1]. Данный вид экспертизы использует в качестве детектора орган обоняния специально обученной собаки [2, 3]. Как следствие, основным методом ольфакторного исследования служит известный из зоопсихологии метод выбора из множества по образцу на основе анализа рефлексии животных [4]. Ольфакторный анализ является хорошо изученным и считается высокоточным методом проведения криминалистических экспертиз [5, 6]. Одним из основных этапов проведения ольфакторного исследования является составление экспертами этограммы. К этограмме предъявляются требования, которые строго регламентированы, что гарантирует достоверность и высокую точность экспертизы. Стоит отметить, что в каждой стране перечень данных требований и особенности проведения экспертизы различны [2, 7]. В данной работе рассматриваются требования предъявляемые к составлению этограммы в Россий-

ской Федерации для проведения ольфакторной экспертизы для одного объекта и одного проверяемого лица.

Большое число публикаций по теме ольфакторного анализа, как в отечественных журналах, так и в зарубежных, посвящено исследованию вопросов юриспруденции, криминалистики [7], кинологии [4, 8] и медицины [5, 9]. Предъявляемые к построению этограммы требования порождают трудную математическую задачу размещения исследуемых объектов в нескольких рядах с перекрестными условиями, которая даже с учетом невысокой размерности на практике занимает достаточное время у экспертов на ее составление. В научных исследованиях этот аспект ольфакторного анализа опущен, что будет восполнено в настоящей работе.

Предлагается строить этограмму как слово специфического формального языка над конечным алфавитом. Слова данного языка обладают следующими свойствами: одинаковая длина слов, ограничения и запреты на внутреннюю структуру слов, определяемые требованиями к проведению экспертизы. Языки, обладающие подобными свойствами, и их комбинаторные характеристики рассматривались в следующих работах [10–17]. В настоящее время активно исследуются языки, избегающие степени, в которых накладываются ограничения на внутренние повторы элементов [13]. Другим актуальным направлением является вычисление комбинаторных характеристик формальных языков, а именно комбинаторная сложность языков, минимизация анτισловаря, алгоритмизация построения [14, 15, 17].

Раздел 1 посвящен необходимым понятиям, определениям и требованиям предъявляемым к ольфакторной идентификационной экспертизе при проверке одного объекта и одного проверяемого лица. В разделе 2 предлагается математическая постановка задачи составления этограммы на основе теории формальных языков. Раздел 3 содержит описание алгоритмов для построения деревьев шаблонов для каждого сравнительного ряда, а также алгоритм заполнения шаблонов для получения итоговой этограммы, соответствующей всем предъявляемым требованиям. Обсуждение результатов работы и перспективные направления исследования представлены в разделе Заключение.

1. Об особенностях ольфакторной экспертизы

С криминалистической точки зрения основная задача в ольфакторном исследовании состоит в установлении наличия пахучих следов конкретных лиц на объектах, изымаемых по расследуемым делам [18]. Результатом ольфакторного исследования является заключение экспертов, которое содержит один из четырех выводов:

- выявлены пахучие следы проверяемого человека (категорически положительный);
- не выявлены пахучие следы проверяемого человека (категорически отрицательный);
- вероятное присутствие пахучих следов;
- не представляется возможным.

Для разграничения вероятного и категорически положительного результата используют имеющиеся вероятностно-статистические расчеты ученых Российского федерального центра судебной экспертизы при МЮ РФ [5] и Экспертно-криминалистического центра МВД России [6].

Процедура ольфакторного исследования зачастую проводится по одному алгоритму [3, 7]. Специалист проводит собаку-детектора вдоль станций сравнительного ряда из открытых емкостей для поочередного обнюхивания помещенных в них запаховых проб. При наличии

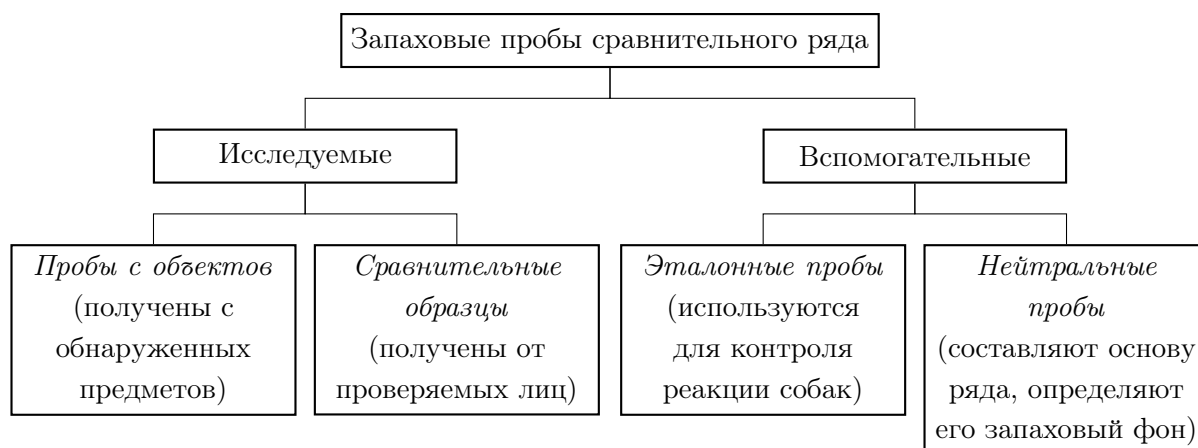


Рис. 1. Разновидности запаховых проб, используемых в сравнительных рядах, с позиции их функционального назначения

Таблица 1. Пробы, участвующие в идентификационной экспертизе

| Название пробы | Тип пробы | Идентификатор пробы |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Исследуемый объект | Вещь | И. |
| Лицо контрольной группы | Вещь | 1-5 |
| Эталон | Кровь | Э. |
| Нейтральный Эталон | Кровь | Н.Э. |
| Лицо контрольной группы | Кровь | 6-7 |
| Лицо контрольной группы (замена) | Кровь | 8 |

среди них пробы с заданной к поиску ольфакторной характеристикой, воспринявшая этот запах собака-детектор принимает выработанную дрессировкой сигнальную позу — садится у этого объекта. Данное поведение сопровождается пищевым подкреплением собаки-детектора и фиксируется в протоколах работы (этограммах).

Предварительное составление этограммы, как рабочей карты исследования, позволяет эксперту до начала ольфакторной экспертизы продумать варианты расстановки запаховых проб. Сравнительный ряд этограммы наполняют различными пробами, каждая из которых выполняет специальную функцию [2]. Виды проб, применяемые МВД РФ при проведении экспертизы, представлены на рис. 1.

Согласно регламенту для проведения идентификационной экспертизы проверки одного объекта и одного проверяемого лица требуется составить четыре различных сравнительных ряда, которые должны удовлетворять установленным требованиям [2]. Запаховые пробы подразделяются на два типа: проба, взятая с вещи; проба, взятая из крови. В данной экспертизе используется шесть проб вещей и четыре пробы крови. В табл. 1 представлены все пробы, которые могут появиться в сравнительных рядах, при этом в первых двух рядах не используется проба замены (проба номер 8), а в третьем и четвертом рядах удаляется нейтральный эталон (проба Н.Э.).

На основе многолетней экспертной практики сформулированы методические рекомендации и требования относительно процедуры идентификационного ольфакторного исследования с использованием обоняния собак-детекторов [2]. Данные требования представлены ниже в виде ограничений, которым должны удовлетворять сравнительные ряды в ольфак-

торной идентификационной экспертизе при проверке одного объекта и одного проверяемого лица. Буквой «О» обозначены обязательные требования, буквой «Р» — рекомендации.

- О1 Длина проводок должна быть разной в каждом ряду.
- О2 Движение должно быть в различном направлении (по часовой стрелке или против) и с различной станцией в каждом ряду.
- О3 Первые две проводки должны заканчиваться на станции с пробой Н.Э., а третья и четвертая проводки должны заканчиваться на станции с пробой Э.
- О4 Первая проводка должна содержать пробу со схожей ольфакторной характеристикой, взятой с вещи или из крови, перед пробами И. и Э., соответственно.
- О5 Все пробы, кроме пробы номер 8, должны присутствовать в первых двух проводках.
- О6 Пробы не должны встречаться на тех же станциях, что и в предыдущих рядах. Все пробы расположенные на станциях вне проводки не влияют на выполнение этого требования.
- О7 Пробы И., Э., Н.Э. не должны располагаться на соседних станциях.
- О8 В каждой из двух первых проводок должны содержаться пробы И., Э., Н.Э.
- О9 Недопустимо размещать более двух проб в третьей и четвертой проводках с одинаковой ольфакторной характеристикой, и более трех проб в первых двух проводках.
- О10 Недопустимо размещать пробу, взятую из крови, перед пробой И.
- О11 Недопустимо размещать пробы И., Э., Н.Э. на станциях, где собака получала пищевое подкрепление.

Дополнительно предъявляются необязательные рекомендации к сравнительным рядам.

- Р1 Одинаковые пробы не должны размещаться перед пробами И., Э., Н.Э. в соседних рядах.
- Р2 В третьей и четвертой проводках должно быть различное число станций между пробами И. и Э.
- Р3 Проба номер 8 должна находиться в начале проводки.
- Р4 Пробы И. и Э. не должны быть первыми в ряду.

Перечисленные требования накладывают ограничения не только на расположение проб внутри сравнительных рядов, но и на их размещение между рядами. Так, первый ряд определяет дополнительные ограничения на второй, второй на третий, а третий на четвертый. Данные свойства каждого требования отражены в табл. 2, где символ «+» означает влияние требования на внутреннюю структуру ряда, а символ «*» означает влияние требования на расположение пробы в зависимости от предыдущих рядов.

Таблица 2. Влияние ограничений на каждый ряд этограммы

| | О1 | О2 | О3 | О4 | О5 | О6 | О7 | О8 | О9 | О10 | О11 | Р1 | Р2 | Р3 | Р4 |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|
| Ряд 1 | | | + | + | | | + | + | + | + | | | | | + |
| Ряд 2 | * | * | + | | * | * | + | + | + | + | * | * | | | + |
| Ряд 3 | * | * | + | | | * | + | | + | + | * | * | | + | + |
| Ряд 4 | * | * | + | | | * | + | | + | + | * | * | * | + | + |

Исходя из высказанных наблюдений очевидно, что задача составления сравнительных рядов для запаховых следов имеет комбинаторный характер. В качестве иллюстрирующего примера, в табл. 3 представлена этограмма, удовлетворяющая всем требованиям и ограничениям. Синим цветом выделена стартовая позиция ряда (станция), зеленым — предпола-

гаемое завершение проводки при положительной экспертизе, красным — пробы, которые не должны быть проноханы во время проводки. Стрелками указаны стартовая позиция и направление проводки. Символ «*» означает предполагаемое место посадки собаки-детектора, буква «п» означает место пищевого подкрепления. Так, в первом ряду длина проводки составляет девять проб, а в третьем — семь проб, однако собака-детектор должна распознать связь между пробой И. и Э., поэтому выделено несколько мест посадки. Всё что находится в ряду вне границ проводки не обязано удовлетворять условиям.

Таблица 3. Пример корректной этограммы

| Заданная проба | Позиция пробы в ряду | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------|--------|----|----------|--------|---------|---|----------|------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Н.Э. | 1 → | И. | 6 | 3 | Э. | 7 | 5 | 2 | Н.Э. *п | 4 |
| Н.Э. | Н.Э. *п | 3 | И. | 1 | 6 | Э. | 2 | 4 ← | 5 | 7 |
| Э. | 5 | 2 → | 6 | 7 | 4 | И. * | 8 | Э. *п | 1 | 3 |
| Э. | 4 | 2 | 7 | И. *п | 3 ← | 5 | 1 | 8 | 6 | Э. *п |

2. Математическая постановка задачи составления этограммы

Для дальнейшего изложения используются классические определения и обозначения теории формальных языков [10–12].

Определим несколько множеств объектов, из которых состоят сравнительные ряды. Пусть множество $V = \{v_1, \dots, v_5, v_0\}$ определяет запаховые пробы, взятые с вещей, где v_0 — исследуемый объект. Множество $K = \{k_6, k_7, k_8, k_e, k_n\}$ задает запаховые пробы, полученные из крови, где k_e — эталонный элемент, а k_n — нейтральный эталон. Таким образом, общий набор элементов для построения каждого сравнительного ряда определяется множеством $\Sigma = V \cup K$, при этом первые два ряда используют алфавит $\Sigma^{1,2} = \Sigma \setminus \{k_8\}$, а последние алфавит $\Sigma^{3,4} = \Sigma \setminus \{k_n\}$. Тогда языки для каждого сравнительного ряда состоят из слов, содержащих десять неповторяющихся символов над алфавитом Σ , и удовлетворяют ограничениям на внутреннюю структуру ряда.

Определим языки L_1, L_2, L_3 и L_4 для каждого сравнительного ряда [19, 20]. Процедура построения слов для каждого языка базируется на понятии шаблона сравнительного ряда. Шаблон сравнительного ряда β учитывает ограничения на внутреннее размещение символов в слове языка в рамках проводки. Для построения шаблонов каждого языка будем использовать следующее допущение: любой элемент из $\{v_1, \dots, v_5\}$ будем обозначать как v , а элемент из $\{k_6, k_7, k_8\}$ как k , соответственно. Тогда язык шаблонов B_i для i -го сравнительного ряда определяется над алфавитом $\Sigma^\beta = \{k, v, v_0, k_e, k_n\}$ и удовлетворяет ограничениям на внутреннюю структуру ряда. Согласно положительному результату экспертизы собака-детектор выполняет обход проб от стартовой позиции до предполагаемого места посадки, при этом пробы, размещаемые в оставшейся части ряда, не будут проноханы. Тогда слово для i -го ряда $w \in L_i$ является конкатенацией двух слов $w = \hat{\beta} \cdot \hat{\gamma}$, где $\hat{\beta}$ —

значащая часть ряда, которая определяет пробы от стартовой позиции до предполагаемого места посадки, а $\hat{\gamma}$ — символы алфавита Σ^i не вошедшие в $\hat{\beta}$, т. е. оставшиеся пробы, которые не будут проноханы. Будем говорить, что $\hat{\beta}$ удовлетворяет шаблону $\beta \in B_i$ если для символа v в шаблоне β на соответствующей позиции в $\hat{\beta}$ расположен любой символ из $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, а для символа k — любой символ из $\{k_6, k_7, k_8\}$, и записывать как $\hat{\beta} \sim \beta$. Заметим, что размер всех слов из B_i ограничен сверху и снизу. Далее, словом ζ будем обозначать последовательность символов в слове β , на которую накладывается ограничение. Пусть слово β конкатенация слов δ, η , и, возможно, ζ , где δ — префикс, а η — суффикс. Обозначение $\{z\}^m, m \in \mathbb{Z}^+$ означает последовательность из m символов z некоторого алфавита. В табл. 4 приведены ограничения, которые влияют на шаблоны рядов согласно табл. 2. В РЗ не указано, что понимается под началом ряда, поэтому в рамках модели началом ряда будут считаться первые три элемента.

Определим операцию формирования языка остаточной части $\Gamma(\hat{\beta}, \Sigma')$. Данная операция порождает язык, который содержит все слова длины $10 - |\hat{\beta}|$, состоящие из неповторяющихся символов алфавита $\Sigma' \setminus \{z: z \in \hat{\beta}\}$. Таким образом, словами являются все возможные перестановки символов нового алфавита.

Будем считать, что шаблон первого ряда всегда соответствует проводке, которая начинается с первой позиции и выполняет обход по часовой стрелке, т. е. выполнение требований ряда проверяется в направлении слева направо. Данное условие не противоречит общему способу построения, но значительно упрощает дальнейшее изложение. Поскольку первый ряд никак не зависит от других, то согласно табл. 4, определим язык шаблонов B_1 :

$$B_1 = \{\beta: 6 \leq |\beta| \leq 10, R_1\},$$

где R_1 — набор ограничений для первого ряда, состоящий из ОЗ' (ОЗ в ослабленном виде), О4, О7, О8, О9' (О9 в ослабленном виде), О10, и рекомендации Р4. Таким образом, язык первого ряда можно записать следующим образом:

$$L_1 = \left\{ w: w = \hat{\beta} \cdot \hat{\gamma}, \hat{\beta} \sim \beta, \beta \in B_1, \hat{\gamma} \in \Gamma(\hat{\beta}, \Sigma^{1,2}) \right\}.$$

По результатам работы алгоритма построения дерева шаблонов, который будет представлен далее в разделе 3, установлены следующие характеристики языка L_1 . Число шаблонов $\beta \in B_1$ составляет 99 шаблонов, при этом число уникальных заполнений $\hat{\beta}$ символами из алфавита $\Sigma^{1,2}$ равно 12 964. С учетом произвольной последовательности символов в $\hat{\gamma}$ мощность языка L_1 составляет 510 720 слов.

Начиная со второго ряда добавляются ограничения, которые влияют не только на шаблон ряда, но и на его наполнение. Особенности того, как учитывать данные ограничения, будут рассмотрены далее. Приведем вид оставшихся языков и их характеристики.

Аналогично первому ряду, определим язык шаблонов B_2 :

$$B_2 = \{\beta: 5 \leq |\beta| \leq 10, R_2\},$$

где набор ограничений R_2 состоит из ОЗ' (ОЗ в ослабленном виде), О7, О8, О9' (О9 в ослабленном виде), О10, и рекомендации Р4. Благодаря отсутствию ограничения О4, минимальная длина шаблона β уменьшилась до 5. Тогда язык второго ряда имеет вид

$$L_2 = \left\{ w: w = \hat{\beta} \cdot \hat{\gamma}, \hat{\beta} \sim \beta, \beta \in B_2, \hat{\gamma} \in \Gamma(\hat{\beta}, \Sigma^{1,2}) \right\}. \quad (1)$$

Таблица 4. Математическое описание ограничений на шаблон ряда

| Ограничение | | Математическое описание |
|-------------|--|---|
| О3 | Первый и второй ряды должны оканчиваться пробой Н.Э. | $\forall \beta: \beta \sqsupseteq k_n$ |
| О3' | Второй и третий ряды должны оканчиваться пробой Э. | $\forall \beta: \beta \sqsupseteq k_e$ |
| О4 | Первый ряд должен содержать пробу со схожей ольфакторной характеристикой, перед пробами И., Э. | $\beta = \delta \cdot \{v_0\} \cdot \eta: \delta = \delta_1 \cdot \{v\} \cdot \delta_2,$ $\beta = \delta \cdot \{k_e\} \cdot \eta: \delta = \delta_1 \cdot \{k\} \cdot \delta_2$ |
| О5 | В первых двух рядах должны присутствовать все пробы, кроме пробы 8 | $\hat{\beta}_1 \cdot \hat{\beta}_2 = \langle \delta, N, \eta \rangle,$ где $N \in \Sigma^{1,2}, \hat{\beta}_1 \cdot \hat{\gamma}_1 \in L_1, \hat{\beta}_2 \cdot \hat{\gamma}_2 \in L_2.$ |
| О7 | Пробы И., Э., Н.Э. не должны находиться рядом | $\beta = \langle \delta, \zeta, \eta \rangle,$ где $\zeta \notin \{v_0 k_e, v_0 k_n, k_e v_0, k_e k_n, k_n v_0, k_n v_e\}$ |
| О8 | Первые два ряда должны содержать пробы И., Э., Н.Э. | $\beta = \langle \delta, \{e\}, \eta \rangle,$ где $e \in \{v_0, k_e, k_n\}$ |
| О9 | Запрещено размещать четыре и более пробы с одинаковой ольфакторной характеристикой | $\zeta \neq \{z^4\}, z \in \{k, k_e, k_n\},$ $\zeta \neq \{z^4\}, z \in \{v, v_0\},$ где $\zeta: \beta = \delta \cdot \zeta \cdot \eta$ |
| О9' | Запрещено размещать три и более пробы с одинаковой ольфакторной характеристикой | $\zeta \neq \{z^3\}, z \in \{k, k_e, k_n\},$ $\zeta \neq \{z^3\}, z \in z \in \{v, v_0\},$ где $\zeta: \beta = \delta \cdot \zeta \cdot \eta$ |
| О10 | Запрещено размещать пробу полученную из крови перед пробой И. | $\zeta \neq \{k v_0\},$ где $k \in K, \zeta: \beta = \delta \cdot \zeta \cdot \eta$ |
| Р3 | Проба номер 8 должна находиться в начале проводки. | $\beta = \delta \cdot \eta: k_8 \in \delta$ и $ \delta = 3$ |
| Р4 | Пробы И. и Э. не должны быть первыми в ряду. | $\beta = \delta \cdot \eta, \delta \notin \{k_e, k_n, v_0\}$ и $ \delta = 1$ |

Число шаблонов $\beta \in B_2$ составляет 103 шаблона, при этом число уникальных заполнений $\hat{\beta}$ символами из алфавита $\Sigma^{1,2}$ равно 13 069. Учитывая произвольную последовательность символов в γ , мощность языка L_2 составляет 870 720 слов. Это наиболее многочисленный язык, среди всех остальных.

Третий и четвертый ряды обладают одинаковым набором ограничений на шаблон ряда, и, как следствие, одинаковым набором слов в языке. Определим языки шаблонов третьего

и четвертого рядов:

$$B_{3,4} = \{\beta: 4 \leq |\beta| \leq 10, R_{3,4}\},$$

где набор ограничений $R_{3,4}$ состоит из О3, О7, О9, О10 и рекомендаций Р3,Р4. Минимальная длина шаблона β составляет 4 символа. Теперь определим языки L_3 и L_4 :

$$L_{3,4} = \left\{ w: w = \hat{\beta} \cdot \hat{\gamma}, \hat{\beta} \sim \beta, \beta \in B_{3,4}, \hat{\gamma} \in \Gamma(\hat{\beta}, \Sigma^{3,4}) \right\}. \quad (2)$$

Число шаблонов $\beta \in B_{3,4}$ составляет 35 шаблонов, при этом число уникальных заполнений $\hat{\beta}$ символами из алфавита $\Sigma^{3,4}$ равно 1 340. Учитывая произвольную последовательность символов в γ , мощность каждого языка L_3 и L_4 составляет 21 360 слов.

Сравнение всех характеристик языков L_1, \dots, L_4 представлены в табл. 5.

Таблица 5. Характеристики формальных языков для сравнительных рядов ольфакторной экспертизы

| Номер ряда | Язык L_i | Число шаблонов $ B_i $ | Число уникальных заполнений $\hat{\beta}_i$ | Мощность языка |
|------------|------------|------------------------|---|----------------|
| 1 | L_1 | 99 | 12 964 | 510 720 |
| 2 | L_2 | 103 | 13 069 | 870 720 |
| 3 | L_3 | 35 | 1 340 | 21 360 |
| 4 | L_4 | 35 | 1 340 | 21 360 |

На основе введенных определений можно сформулировать задачу построения сравнительных рядов ольфакторного анализа следующим образом:

Дано: алфавит Σ , языки L_1, L_2, L_3 и L_4 .

Требуется: найти слова $w_1 \in L_1, w_2 \in L_2, w_3 \in L_3$ и $w_4 \in L_4$, удовлетворяющие требованиям О1–О11 и рекомендациям Р1–Р4.

Для решения данной задачи предлагается ряд алгоритмов, представленных в следующем разделе.

3. Алгоритмы построения сравнительных рядов ольфакторного анализа

3.1. Алгоритм построения дерева шаблонов

В предыдущем разделе упоминался алгоритм построения дерева шаблонов для каждого сравнительного ряда. В данном случае под деревом понимается ориентированный граф $G = (V, E)$, где V — множество вершин, а E — упорядоченное множество пар вершин $e = (x, y)$, где $x, y \in V$. Зададим функцию $\varphi: E \rightarrow \{k_e, k_n, v_0, k, v\}$. Пусть функция φ ставит каждому ребру специальную метку, которая определяет тип запаховой пробы. Таким образом, граф формируется следующим образом. Из корневой вершины исходят все ребра e с метками проб, которые могут стоять на первой позиции соответствующего ряда. Так для первого ряда это будут два ребра с метками v и k . Продолжая спускаться вглубь дерева, формируется шаблон ряда, при этом ребро, которое приводит в листовую вершину содержит метку k_n для первых двух рядов и метку k_e для третьего и четвертого рядов.

Основная идея алгоритма заключается в рекурсивном построении дерева шаблонов, путем проверки всех ограничений на шаблон ряда на каждом шаге. Так рекурсивный вызов происходит для каждой метки, которая не противоречит ограничению:

- проба k может быть выставлена, если
 - текущая последовательность проб, взятых из крови, меньше трех (двух для заключительных рядов);
 - количество проб k меньше двух в ряду (трех для заключительных);
- проба v может быть выставлена, если
 - текущая последовательность проб, взятых с вещей, меньше трех (двух для заключительных рядов);
 - количество проб v меньше пяти в ряду;
- проба v_0 может быть выставлена, если
 - текущая последовательность проб, взятых с вещей, меньше трех (двух для заключительных рядов);
 - прошлая проба была взята не из крови;
 - проба v_0 не представлена в ряду;
 - ранее была выставлена проба, взятая с вещи (для первого ряда);
- проба k_e может быть выставлена, если
 - текущая последовательность проб, взятых из крови, меньше трех (двух для заключительных рядов);
 - ранее была выставлена проба, взятая из крови (для первого ряда);
 - прошлая проба не является v_0 или k_n ;
 - проба k_e не представлена в ряду;
- проба k_n может быть выставлена, если
 - текущая последовательность проб, взятых из крови, меньше трех (двух для заключительных рядов);
 - ранее была выставлена проба, взятая из крови (для первого ряда);
 - прошлая проба не является v_0 или k_e ;
 - в ряду представлены v_0 и k_e (для первого и второго ряда);
 - проба k_n не представлена в ряду.

Общее правило для всех проб — длина ряда не превосходит 10 проб, что гарантирует завершение рекурсивного алгоритма построения. При этом, после установки пробы k_n текущая ветвь рекурсии всегда заканчивается. В алгоритме может возникнуть ситуация, когда невозможно выставить пробу, например, для последовательности $vv_0vkvvkve$. В данном примере остается проба k_n , но она не должна соседствовать с k_e . В этом случае рекурсия также заканчивает свою работу, однако в листовую вершину ведет ребро не с меткой k_n . Поэтому используются процедура очистки висячих вершин, в которые не ведет ребро с меткой k_n для первых двух рядов и меткой k_e в заключительных рядах.

Суть процедуры очистки заключается в определении списка висячих вершин, в которые ведет ребро с некорректной меткой и их удалении. Алгоритм повторяется до тех пор, пока во все висячие вершины не будут вести ребра с заключительной меткой соответствующей ряду.

После завершения работы алгоритма формируется дерево шаблонов, которое используется далее для формирования ряда. Стоит отметить, что для экономии занимаемой памяти все листовые вершины дерева шаблонов можно заменить одной вершиной, в которую ве-

дут все ребра с заключительной меткой, получив при этом ориентированный ациклический граф. Примеры получаемых графов представлены в работах [19–21].

3.2. Алгоритм построения сравнительных рядов

Как было сказано ранее, каждый сравнительный ряд состоит из проводки и оставшейся части. Проводка формируется на основе шаблона ряда, который получается из дерева шаблонов, описанного выше. Шаблон формируется при обходе дерева шаблонов от корневой вершины до листовой. Каждый переход по ребру добавляет метку к шаблону ряда. Согласно выбранному шаблону, проводка заполняется конкретными пробами, учитывая ограничения O1, O2, O5, O6, O11 и рекомендации P1, P2. Оставшиеся пробы могут быть размещены в случайном порядке в окончании ряда, поскольку при положительном результате экспертизы они не влияют на результат. Если k — количество оставшихся символов, то в алгоритме для построения оставшейся части равномерно выбирается одна из возможных перестановок этих символов с вероятностью $1/k!$.

Учитывая особенности сравнительных рядов, описанных ранее, в алгоритме полагается, что движение в нечетных рядах совершается вправо, а в четных — влево. Первый ряд всегда начинается с первой позиции, последующие ряды начинаются с произвольной позиции, отличной от предыдущих рядов. Очевидно, что все ряды в совокупности можно линейным образом сдвигать. В процессе построения рядов вычисляются индексы, учитывающие относительные сдвиги между положением проб, которые позволяют проверять ограничения O1, O2, O5, O6, O11 и рекомендации P1, P2.

Стоит отметить, что при определенном выборе шаблонов и их заполнении может возникнуть ситуация, при которой невозможно удовлетворить всем ограничениям. В этом случае алгоритм отказывается от текущих выбранных рядов и начинает генерацию с первого ряда.

4. Анализ работы программного комплекса

Разработанные алгоритмы представлены в виде комплекса программ. Комплекс программ реализован на языке C++ стандарта C++17 и графической библиотеки Dear ImGui с применением средств автоматизации CMake. В ходе работы комплекса программ выполняется построение четырех деревьев шаблонов для каждого ряда L_1 – L_4 , на основе которых формируется готовая этограмма исследования. Далее программа строит таблицу с шаблонами, где каждому ряду ставится в соответствие один шаблон, выбранный случайным образом из дерева. На основе данной таблицы происходит конструктивное заполнение шаблонов и их слияние в готовую этограмму согласно алгоритму из подраздела 3.2. Таким образом, результатом работы комплекса являются две таблицы: таблица, содержащая один шаблон для каждого из четырех рядов, и построенная этограмма исследования. Комплекс программ работает исключительно для рядов длины 10, поскольку это регламентировано порядком проведения экспертизы. Полученные деревья шаблонов, коды для визуализации и оценки размерностей представлены в открытом доступе [21]. Далее приводятся несколько экспериментов по заполнению этограммы.

Таблицы 6 и 7 представляют результат работы комплекса программ. В табл. 6 указаны выбранные шаблоны для каждого ряда, а в табл. 7 — заполненные ряды согласно выбранным шаблонам. Цветами в таблицах обозначены старт и окончание проводки, а также неиспользуемые в проводке станции, аналогично табл. 3. Символом « \circ » обозначены

позиции, которые не используются в шаблоне, т. е. фактически принадлежащие слову γ из конкатенации $\alpha = \beta \cdot \gamma$.

Таблица 6. Шаблоны для каждого сравнительного ряда

| | Позиция ряда | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------------|----------|----------|-------------|-------|-------|----------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ряд 1 | k → | v | k | v | v_0 | v | k_e | v | v | k_n |
| Ряд 2 | v | k_e | v | v ← | \emptyset | k_n | k | v_0 | v | k |
| Ряд 3 | \emptyset | \emptyset | v → | v | k | v | v_0 | k | k_e | \emptyset |
| Ряд 4 | k_e | v | k | v_0 | v | k | v | v ← | \emptyset | \emptyset |

Таблица 7. Заполненные сравнительные ряды

| | Позиция ряда | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------|------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ряд 1 | k_6 → | v_1 | k_7 | v_4 | v_0 | v_2 | k_e | v_3 | v_5 | k_n |
| Ряд 2 | v_5 | k_e | v_4 | v_2 ← | v_3 | k_n | k_6 | v_0 | v_1 | k_7 |
| Ряд 3 | v_1 | v_2 | v_3 → | v_5 | k_7 | v_4 | v_0 | k_8 | k_e | k_6 |
| Ряд 4 | k_e | v_5 | k_7 | v_0 | v_1 | k_6 | v_2 | v_3 ← | v_4 | k_8 |

В этом примере получаются следующие шаблоны для каждого ряда: шаблон первого ряда имеет вид $\beta_1 = kvkvv_0vk_evvk_n$, для второго ряда $\beta_2 = vvk_evkvv_0kk_n$, для третьего ряда $\beta_3 = vvkvv_0kk_e$, и для заключительного четвертого ряда $\beta_4 = vvkvv_0kvk_e$.

Также рассмотрим пример, когда невозможно построить шаблон четвертого ряда. В табл. 8 представлены шаблоны первых трех рядов. При таких шаблонах не существует ни одного такого шаблона для четвертого ряда, который мог бы удовлетворить ограничениям ОЗ, О7, О9, О10 и рекомендациям РЗ, Р4.

Заключение

В работе предложен конструктивный алгоритм формирования этограммы для идентификационной ольфакторной экспертизы при проверке одного объекта и одного проверяемого лица. Постановка задачи построения этограммы представлена в виде математической модели, использующей понятия и обозначения теории формальных языков. Решение задачи можно свести к пяти этапам. Первые четыре этапа связаны с построением новых языков, соответствующих четырем сравнительным рядам этограммы, над алфавитом проб Σ . Построенные языки состоят из слов, удовлетворяющих ограничениям О1–О11 и рекомендациям Р1–Р4. Также были разработаны алгоритмы построения всех возможных шаблонов

Таблица 8. Пример шаблонов первых трех рядов, при которых не существует ни одного шаблона для четвертого ряда, удовлетворяющего ограничениям

| | Позиция ряда | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------|-----|-------|-----|----------|-------|-------|-------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ряд 1 | k → | v | v | k | v | k_e | v | v_0 | v | k_n |
| Ряд 2 | ⊙ | k_n | k | v_0 | v | k | k_e | v | v | v ← |
| Ряд 3 | k_e | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | v → | k | v | v_0 | k |

для каждого из четырех сравнительных рядов и выполнен анализ мощности полученных языков. На пятом этапе непосредственно формируется этограмма. Разработан алгоритм, который позволяет строить все возможные слова языков для каждого ряда и их комбинацию, удовлетворяющую всем требованиям. Проанализированы генеративные возможности алгоритма построения этограммы. Следует заметить, что конкатенация четырех языков, соответствующих рядам этограммы, не позволяет построить общий язык этограмм. Это связано с необходимостью учета сдвигов и произвольности начала и направления проводки.

Интерес представляет решение задачи построения языка этограмм средствами смежных разделов теории формальных языков — языков, избегающих степени (с дополнительными ограничениями), и универсальных слов (последовательностей де Брюина) [13, 17]. Также актуален вопрос анализа комбинаторных характеристик и сложности полученной модели. Дальнейшие направления исследований в первую очередь связаны с построением общего языка этограммы, а также разработкой алгоритма верификации произвольной этограммы; алгоритма, присваивающего каждой допустимой этограмме уникальный идентификатор, основанный на ее структурных свойствах, что позволит создать библиотеку готовых этограмм для криминалистических лабораторий.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-02-2026-1314).

Авторы выражают благодарность за постановку задачи, консультации и помощь в исследовании заместителю начальника отдела ЭКЦ ГУ МВД России по Красноярскому краю подполковнику Коршуновой Наталье Васильевне.

Авторы благодарят рецензентов за их время и ценные рекомендации, которые позволили значительно улучшить первоначальную версию статьи и стимулировали дальнейшие исследования.

Литература

1. Министерство внутренних дел Российской Федерации (МВД России) Приказ МВД России от 29.06.2005 № 511 «Вопросы организации производства судебных экспертиз в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации», зарегистрирован в Минюсте России 15.08.2005 № 6903 / Онлайн-версия СПС «КонсультантПлюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_55315/ (дата обращения: 18.12.2025).

2. Сулимов К.Т. Криминалистическая одорология : кинологический подход. Москва: Институт Наследия, 2019. 312 с.
3. Образцов В.А. Криминалистика: учебник. Москва: Юристъ, 1997. 760 с.
4. Зорина З.А., Полетаева И.И. Зоопсихология. Элементарное мышление животных: Учебное пособие. Москва: Аспект Пресс, 2002. 102 с.
5. Собко Г.М. Вероятностно-статистическое обоснование достоверности одорологической идентификации // Вопросы теории судебной экспертизы. Сборник науч. трудов. 1977. № 31. С. 142–177.
6. Панфилов П.Б. Вероятностно-статистическое обоснование достоверности ольфакторных исследований запаховых следов человека в судебной экспертизе // Юридические науки. 2006. Т. 17, № 1. С. 172–186.
7. Ferry B., Ensminger J.J., Schoon A., *et al.* Scent lineups compared across eleven countries: Looking for the future of a controversial forensic technique // Forensic Science International. 2019. Vol. 302. P. 109895. DOI: 10.1016/j.forsciint.2019.109895.
8. Пименов М.Г., Саламатин А.В., Панфилов П.Б. и др. Подготовка собак-детекторов пахучих следов человека: Методические рекомендации. Москва: ЭКЦ МВД России, 2006. 56 С.
9. Панфилов П.Б. Биодетекция и интерпретация поведения собак-детекторов в идентификационном ольфакторном исследовании // Судебная экспертиза. Научно-практический журнал. Волгоград, 2008. Т. 15, № 3. С. 104–112.
10. Ахо А., Ульман Д. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Т. 1. Москва: Мир, 1978. 612 С.
11. Lothaire M. Algebraic Combinatorics on Words. Cambridge University Press, 2002. 455 p. Encyclopedia of Mathematics and its Applications. DOI: 10.1017/CB09781107326019.
12. Substitutions in Dynamics, Arithmetics and Combinatorics. Vol. 1794 / ed. by N.P. Fogg, V. Berthé, S. Ferenczi, *et al.* Springer Berlin, Heidelberg, 2002. 402 p. Lecture Notes in Mathematics. DOI: 10.1007/b13861.
13. Petrova E.A., Shur A.M. Branching Densities of Cube-Free and Square-Free Words // Algorithms. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 1–19. DOI: 10.3390/a14040126.
14. Шур А.М. Комбинаторная сложность рациональных языков // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 1. 2005. Т. 12, № 2. С. 78–99.
15. Белаззуги Д., Колпаков Р., Раффино М. Индексация и выявление символьных множеств в одномерных и двумерных словах // Фундаментальная и прикладная математика. 2015. Т. 20, № 6. С. 3–16.
16. MacFie A. Enumerative properties of restricted words and compositions. Carleton University, 2019. 121 p. DOI: 10.22215/etd/2019-13532.
17. Chen H.Z., Kitaev S., Mütze T., Sun B.Y. On universal partial words // The European Conference on Combinatorics, Graph Theory and Applications, EUROCOMB'17, Vienna, August 28 – September 1, 2017. Vol. 61. 2017. P. 231–237. DOI: 10.1016/j.endm.2017.06.043.

18. Старовойтов В.И. Судебная ольфакторная экспертиза следов пахнущих веществ из крови и пота человека // Законы России: опыт, анализ, практика. Москва, 2011. № 12. С. 70–79.
19. Soldatenko A., Semenova D., Goldenok E., *et al.* Research on the Problem of Constructing Scent Lineups of Olfactory Analysis // 2023 IEEE 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT, Baku, October 18–20, 2023). IEEE, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/AICT59525.2023.10313149.
20. Солдатенко А.А., Семенова Д.В. Построение сравнительных рядов для задачи ольфакторного анализа // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2024): материалы XXIII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Томск, 20–26 октября 2024. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2024. С. 263–268.
21. Glincka/dogtree-data Деревья шаблонов для задачи составления этограммы в Российской Федерации для проведения ольфакторной экспертизы для одного объекта и одного проверяемого лица. URL: <https://github.com/Glincka/dogtree-data> (дата обращения: 02.04.2026).

Солдатенко Александр Александрович, к.ф.-м.н., кафедра высшей и прикладной математики, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Российская Федерация)

Семенова Дарья Владиславовна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра высшей и прикладной математики, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse260104

MATHEMATICAL MODELING AND ALGORITHMS FOR PROBLEM OF CONSTRUCTING SCENT LINEUPS OF OLFACTORY ANALYSIS FOR SINGLE OBJECT AND SINGLE TEST SUBJECT

© 2026 A.A. Soldatenko, D.V. Semenova

Siberian Federal University (pr. Svobodny 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia)

E-mail: ASoldatenko@sfu-kras.ru, DVSeimonova@sfu-kras.ru

Received: 30.12.2025

The aim of this study is to develop algorithms and a software package for generating scent lineups for odor traces in olfactory forensic examination. A mathematical model based on formal language theory is proposed for the problem of constructing scent lineups and forming an ethogram for identification-oriented olfactory examination involving a single object and a single test subject. An ethogram serves as a working research map, documenting the placement of objects in lineups, the deployment, and the signaling behavior of detector dogs. For each of the four comparative sequences within the ethogram of the examination under consideration, a distinct formal language is constructed. The generation of ten-letter words for each language follows standardized requirements, which allowed for the identification of specific templates. A template defines the order of placement for meaningful odor samples within each lineup. Thus, the mathematical problem of ethogram compilation is reduced to selecting four words from their corresponding languages. This problem is combinatorial nature, subject to multiple constraints dictated by the practical field. The paper presents a description of the algorithms and the software package developed to solve the stated problem. An analysis of the language cardinality for each lineup is performed, and the generative capabilities of the ethogram construction algorithm are examined.

Keywords: olfactory analysis, ethogram, formal language, combinatorics, algorithmization.

FOR CITATION

Soldatenko A.A., Semenova D.V. Mathematical Modeling and Algorithms for Problem of Constructing Scent Lineups of Olfactory Analysis for Single Object and Single Test Subject. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2026. Vol. 15, no. 1. P. 80–95. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse260104.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Rossiyskoy Federatsii (MVD Rossii) M. vnutrennikh del Prikaz MVD Rossii ot 29.06.2005 No. 511 “Voprosy organizatsii proizvodstva sudebnykh ekspertiz v ekspertno-kriminalisticheskikh podrazdeleniyakh organov vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii”, Registered with the Ministry of Justice of Russia on 15.08.2005 No. 6903. / Online version of the legal reference system “ConsultantPlus”. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_55315/ (accessed: 18.12.2025) (in Russian).
2. Sulimov K.T. Kriminalisticheskaya odorologiya: kinologicheskij podhod. Moscow: Russian Heritage Institute, 2019. 312 p. (in Russian).
3. Obrazcov V.A. Kriminalistika: uchebnik. Moscow: YUrist, 1997. 760 p. (in Russian).
4. Zorina Z.A., Poletaeva I.I. Zoopsihologiya. Elementarnoe myshlenie zhivotnyh: Uchebnoe posobie. Moscow: Aspect Press Ltd, 2002. 102 p. (in Russian).
5. Sobko G.M. Veroyatnostno-statisticheskoe obosnovanie dostovernosti odorologicheskoy identifikacii. Voprosy teorii sudebnoj ekspertizy. Sbornik nauch. trudov. 1977. No. 31. P. 142–177. (in Russian).
6. Panfilov P.B. Veroyatnostno-statisticheskoe obosnovanie dostovernosti ol’faktornyh issledovaniy zapahovyh sledov cheloveka v sudebnoj ekspertize. YUridicheskie nauki. 2006. Vol. 17, no. 1. P. 172–186. (in Russian).
7. Ferry B., Ensminger J.J., Schoon A., *et al.* Scent lineups compared across eleven countries: Looking for the future of a controversial forensic technique. Forensic Science International. 2019. Vol. 302. P. 109895. DOI: 10.1016/j.forsciint.2019.109895.
8. Pimenov M.G., Salamatin A.V., Panfilov P.B., *et al.* Podgotovka sobak-detektorov pahuchih sledov cheloveka: Metodicheskie rekomendacii. Moscow: EKC MVD Rossii, 2006. 56 p. (in Russian).
9. Panfilov P.B. Biodetekciya i interpretaciya povedeniya sobak-detektorov v indentifikacionnom ol’faktornom issledovanii. Forensic Examination. Volgograd, 2008. Vol. 15, no. 3. P. 104–112. (in Russian).
10. Aho A.V., Ullman J.D. The theory of parsing, translation, and compiling. Vol. 1. NJ: Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1972. 560 p.
11. Lothaire M. Algebraic Combinatorics on Words. Cambridge University Press, 2002. 455 p. Encyclopedia of Mathematics and its Applications. DOI: 10.1017/CB09781107326019.

12. Substitutions in Dynamics, Arithmetics and Combinatorics. Vol. 1794 / ed. by N.P. Fogg, V. Berthé, S. Ferenczi, *et al.* Springer Berlin, Heidelberg, 2002. 402 p. Lecture Notes in Mathematics. DOI: 10.1007/b13861.
13. Petrova E.A., Shur A.M. Branching Densities of Cube-Free and Square-Free Words. Algorithms. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 1–19. DOI: 10.3390/a14040126.
14. Shur A.M. Kombinatornaya slozhnost' ratsional'nykh yazykov [Combinatorial complexity of regular languages]. Diskretnyi Analiz i Issledovanie Operatsii. Seriya 1. 2005. Vol. 12, no. 2. P. 78–99. (in Russian).
15. Belazzougi J., Kolpakov R., Raffinot M. Indexing and Detecting Symbol Sets in One-Dimensional and Two-Dimensional Words. Journal of Mathematical Sciences. 2018. Vol. 233, no. 1. P. 1–9. DOI: 10.1007/s10958-018-3921-y.
16. MacFie A. Enumerative properties of restricted words and compositions. Carleton University, 2019. 121 p. DOI: 10.22215/etd/2019-13532.
17. Chen H.Z., Kitaev S., Mütze T., Sun B.Y. On universal partial words. The European Conference on Combinatorics, Graph Theory and Applications, EUROCOMB'17, Vienna, August 28 – September 1, 2017. Vol. 61. 2017. P. 231–237. DOI: 10.1016/j.endm.2017.06.043.
18. Starovoytov V.I. Forensic Olfactory Expertise Traces of Smelling Substances from the Person Blood and Sweat. Zakony Rossii: opyt, analiz. praktika. Moscow, 2011. No. 12. P. 70–79. (in Russian).
19. Soldatenko A., Semenova D., Goldenok E., *et al.* Research on the Problem of Constructing Scent Lineups of Olfactory Analysis. 2023 IEEE 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT. Baku, October 18–20, 2023. IEEE, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/AICT59525.2023.10313149.
20. Soldatenko A.A., Semenova D.V. Postroenie sravnitel'nykh ryadov dlya zadachi ol'faktornogo analiza. Informational Technologies and Mathematical Modelling (ITMM-2024): Proceedings of the 23rd International Conference named after A.F. Terpugov, Tomsk, October 20–26, 2024. Tomsk: Tomsk State University Publishing, 2024. P. 263–268. (in Russian).
21. Glincka/dogtree-data Templates trees for problem of constructing scent lineups of olfactory analysis for single object and single test subject. URL: <https://github.com/Glincka/dogtree-data> (accessed: 02.04.2026).