

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ВЫСТРЕЛА НА ОБЪЕКТАХ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ МЕТОДОМ РАСТРОВОЙ  
ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки магистратуры 2 курса 2292 группы  
направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»,  
профиль «Менеджмент высокотехнологичного инновационного производства и  
бизнеса»  
института физики

Кульбачук Анны Владимировны

Научный руководитель,

доцент, к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. Звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

В.А. Федоренко

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. Звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

С.Б. Вениг

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2025

## **Введение.**

При расследовании происшествий, связанных с применением огнестрельного оружия, используются различные методы для исследований следов выстрела и других вещественных доказательств. Процесс работы со следами выстрела может быть разделен на несколько стадий: их поиск и обнаружение; фиксация результатов осмотра следов выстрела; изъятие и сохранение следов выстрела; исследование следов выстрела; толкование результатов исследования; составление экспертного заключения.

Действия, проведенные на более ранних этапах работы со следами выстрела, определяют качество конечного результата. Для сбора следов выстрела разработаны и могут использоваться различные методы. Выбор метода для каждого конкретного случая не всегда прост и зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить следующие: природа самих следов выстрела; природа и состояние объектов носителей следов выстрела; отношение следов выстрела к расследуемому событию; предполагаемый метод последующего экспертного исследования следов выстрела; иные факторы и обстоятельства, возникающие при осмотре на месте преступления либо в ходе исследования следов выстрела.

Электронная микроскопия позволяет выявить продукты выстрела, отлагающиеся на мишени, на руках и одежде человека в результате производства им выстрела, а именно частицы, выносимые с потоком пороховых газов и имеющие характерные сфероидальную форму размером 0.5-5 мкм. С помощью электронной микроскопии можно эффективно проводить химический элементный анализ продуктов выстрела, а также исследовать морфологию несгоревших частичек пороха, микрочастичек металлов и других веществ, выбрасываемых пороховой струей на преграду.

Методику исследования с помощью РЭМ условно можно отнести к неразрушающим, поскольку для ее реализации требуется изъятие с преграды только малой части микроколичеств продуктов выстрела.

Актуальность данной работы заключается в том, что растровые электронные микроскопы (далее – РЭМ) играют ключевую роль в проведении современных научных и экспертных исследований, особенно в области судебно-экспертной практики. Их применение для анализа элементного состава и морфологии микрочастиц представляет собой важный инструмент для определения химического состава, структуры и текстуры материалов. Результаты исследований направлены на техническую поддержку расследования преступлений, связанных с применением огнестрельного оружия.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование отложений пороховых газов на объектах окружающей обстановки. Отработка методики определения факта стрельбы из огнестрельного оружия в комнате с целью эффективной реконструкции места происшествия. Для дальнейшего развития методики было применено машинное обучение типа K-NN для бинарной классификации проб по категориям: «присутствуют продукты выстрела» и «отсутствуют продукты выстрела».

На основе поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение выстрела из огнестрельного оружия как физико-химического явления;
2. Исследование проб на наличие продуктов выстрела, взятых из комнат, в которых стреляли и в которых не стреляли из огнестрельного оружия.
3. Определение методом K-ближайших соседей оптимального числа проб для качественной дифференциации проб по классам «продукты выстрела присутствуют» и «продукты выстрела отсутствуют».

Дипломная работа занимает 53 страницы, имеет 24 рисунка и 6 таблиц.

Обзор составлен по 29 информационным источникам.

Во введении рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой описание явления выстрела и формирование отложений продуктов выстрела на преграде, а именно

физикохимические процессы при образовании продуктов выстрела, химический и элементный состав продуктов выстрела, размерные и морфологические характеристики микрочастиц продуктов выстрела, классификация частиц продуктов выстрела, методы исследования, применяемые для выявления продуктов выстрела.

Во втором разделе работы представлены экспериментальные исследования продуктов выстрела методами растровой электронной микроскопии. Данный раздел включает в себя такие подразделы, как методика применения растрового электронного микроскопа при исследовании частиц продуктов выстрела; исследование фонового содержания микрочастиц, характерных для продуктов выстрела.

В третьем разделе работы представляет собой применение машинного обучения, а именно метода К ближайших соседей, для оценки точности классификации, которая может служить количественным обоснованием категорических выводов.

## **Основное содержание работы**

### **1.1 Описание физико-химических процессов при образовании продуктов выстрела**

При образовании продуктов выстрела происходит сложный комплекс физико-химических процессов, суть которых заключается в мгновенном выделении большого количества энергии. Основными химическими реакциями, лежащими в основе выстрела, являются окисление металлов, детонация взрывчатых веществ и превращение химической энергии в тепловую, световую и звуковую энергию. Выстрелом из огнестрельного оружия, в целом, является процесс выброса снаряда из канала ствола оружия за счет энергии пороховых газов, образующихся при сжигании заряда пороха. От удара бойка по капсюлю-воспламенителю боевого патрона, досланного в патронник, воспламеняется ударный состав капсюля и образующиеся конденсированные и газообразные продукты сгорания через затравочные отверстия, проникают в пороховой заряд и зажигают его. Воспламенение порохового заряда обусловлено главным

образом энергией нагретых конденсированных продуктов сгорания капсюльного состава. Во время сгорания частиц порохового заряда образуется большое количество сильно нагретых газов, которые создают в канале ствола высокое давление, действующее на дно пули (снаряд), на дно и стенку гильзы, а также на элементы конструкции огнестрельного оружия [1].

В результате интенсивного повышения давления газов пуля начинает движение и врывается в поля нарезов, затем продвигается с увеличением скорости по каналу ствола, одновременно вращаясь вокруг своей продольной оси. Далее она выбрасывается в направлении оси канала ствола. При этом на срезе ствола происходит резкий сброс давления пороховых газов и их торможение. При резком падении давления происходит потеря устойчивости процессов горения конденсированных продуктов горения, вплоть до полного затухания. Эти не догоревшие конденсированные частицы являются объектами исследования в первую очередь [2].

## **1.2 Химический и элементный состав продуктов выстрела**

Элементарный состав частиц продуктов выстрела определяется главным образом композицией капсюльного состава. В частицах продуктов выстрела были обнаружены такие элементы, как Pb, Sb, S, K, Cl, Ba, Hg которые являются частью различных компонентов капсюльной смеси – элементами иницирующего вещества, сенсibilизатора, горючего, окислителя, стабилизатора и т.д. Следует отметить, что элементный состав продуктов выстрела включает и элементы, входящие в состав гильзы, пули и ствола оружия [3]. В таблице 1 показано, какие химические элементы соответствуют источникам происхождения.

Продукты выстрела имеют многокомпонентный состав, представляющий собой сложную смесь органических и неорганических составляющих, в которой содержатся мелкие пороховые частицы и вещества, образующиеся в результате его горения, продукты разложения капсюля воспламенителя, вещества, образующиеся в результате соприкосновения снаряда и ствола оружия и т.д. [4].

По характеру происхождения продуктов выстрела можно выделить четыре основных вида [5]:

1) вещества, содержащиеся в инициирующем составе капсюля-воспламенителя;

2) вещества, полученные в результате горения порохового заряда и его несгоревшие частицы;

3) вещества, образовавшиеся в результате действия высокой температуры на металлические части оружия и боеприпаса (пуля, колпачок, гильза, кружок капсюля);

4) частицы металлов, образующиеся в результате механического трения снаряда и внутренних стенок канала ствола оружия.

Таблица 1 – Элементы продукты выстрела, характерные для деталей оружия и боеприпасов

Источник происхождения	Элементы
Ствол	Fe
Гильза	Fe, Cu, Zn
Капсюль (оболочка, колпачок, прокладка, кружок) Пуля	Fe, Cu, Zn, Sn, Pb, Ba
Безоболочечная	Pb
Оболочечная: оболочка, сердечник	Fe, Cu, Zn, Sn, Pb

**Размерные и морфологические характеристики микрочастиц продуктов выстрела.** Процесс сгорания пороха происходит при высокой температуре (температура горения пироксилиновых порохов 2000 – 3500 градусов Цельсия), что приводит к плавлению и частичному испарению продуктов разложения капсюльного состава. На выходе снаряда из ствола происходит резкое падение давления и температуры продуктов выстрела за срезом снаряда (пуля). Прежде всего, происходит затвердевание продуктов жидкого разложения капсюльного состава с выделением в них газообразных продуктов сгорания пороха. В результате образуются круглые пористые

частицы относительно тугоплавких компонентов. Дальнейшее охлаждение потока приводит к конденсации относительно плавких компонентов и расслоению частиц (рисунок 1).

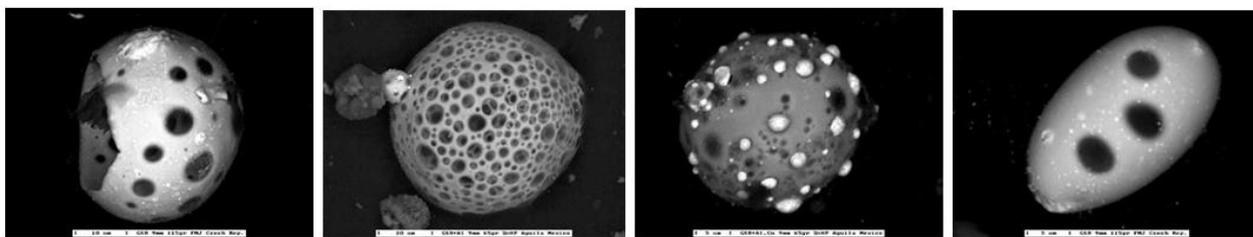


Рисунок 1 – Округлые и пористые частицы продуктов выстрела

В процессе сгорания порохового заряда и движения снаряда по каналу ствола, части продуктов сгорания капсюльного состава конденсируются на холодных стенках ствола, и затем выносятся пороховыми газами. Форма таких частиц может существенно отличаться от сферической (рисунок 2).

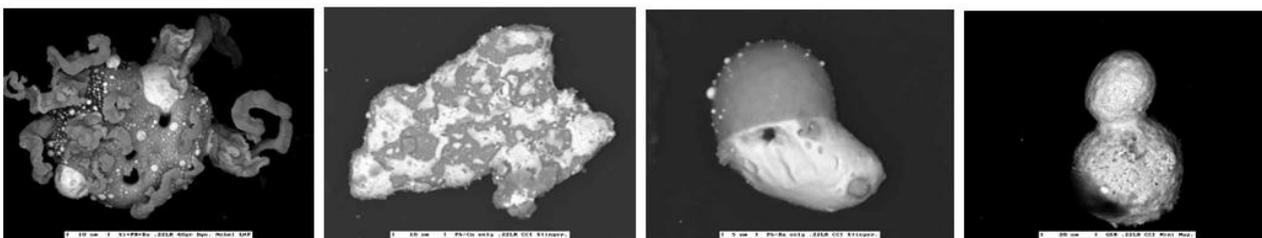


Рисунок 2 – Частицы продуктов выстрела произвольной формы

**Классификация частиц продуктов выстрела.** В последние годы общепринятая классификация частиц продуктов выстрела претерпела некоторые изменения. В настоящее время принято разделять частицы продуктов выстрела по следующим классам:

**Характерные** – частицы, содержащие композиции из трех или четырех химических элементов, характерные для продуктов сгорания капсюльного состава. Ввиду уникальности элементного состава и довольно редкой возможности их обнаружения в окружающей обстановке, присутствие таких частиц интерпретируется как, разумеется, положительный знак наличия частиц продуктов выстрела [6].

**Соответствующие** – частицы, содержащие композиции двух химических элементов, характерные для продуктов разложения капсюльного состава.

Наличие таких частиц указывает на вероятное присутствие частиц продуктов выстрела. Из-за того, что частицы этих композиций могут быть образованы другими процессами, на интерпретацию результатов влияет количество обнаруженных частиц этого класса и многообразие идентифицированных композиций.

**Сопутствующие** – частицы, содержащие некоторые другие химические элементы: железо, медь, свинец, олово, цинк и т.д., образование которых сопровождает процесс производства выстрела (частицы сплава оболочки пули, материала гильзы и капсюля, продукты изнашивания ствола) [7].

В таблице 2 представлена классификация элементного состава продуктов выстрела с оржавляющим и неоржавляющим капсюльным составом.

Таблица 2 – Классификация частиц продуктов выстрела

	<b>Характерные</b>	<b>Сопутствующие</b>	<b>Соответствующие</b>
Оржавляющие	Ртуть, ртуть вместе с сурьмой и серой, или с соединениями калия и хлора, гадолиний, титан, цинк, галлий, медь, олово.	Кремний, кальций, алюминий, медь, железо, сера, фосфор, цинк, никель, калий, хлор и олово.	Кальций, кремний, Титан, цинк, стронций.
Неоржавляющие	Свинец, сурьма и барий.	Свинец (с присутствием сурьмы или без неё), сурьма, барий.	Свинец, барий.

### **1.5 Применение растровой электронной микроскопии при исследовании продуктов выстрела**

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) является инструментом для изучения микроморфологии и тонкой структуры поверхности образцов. Ее

возможности в изучении объектов нанометровых размеров делают этот метод незаменимым во многих областях науки и производства.

Конструктивно РЭМ состоит из следующих основных частей: вакуумная система, служащая для создания разряжения ( $\sim 10^{-3}$  Па), электронно-оптическая колонна, источник электронов, блок электромагнитных линз, устройство формирования изображения, а также устройства для ввода, вывода и перемещения образца под электронным пучком. На рисунке 3 представлена принципиальная схема растрового электронного микроскопа. На рисунке 4 изображен микроскоп, на котором проводились исследования. Пучок электронов падает на поверхность образца, взаимодействуя с веществом. Возникающие при этом отраженные и вторичные электроны, а также фотоны регистрируются соответствующими детекторами [8].

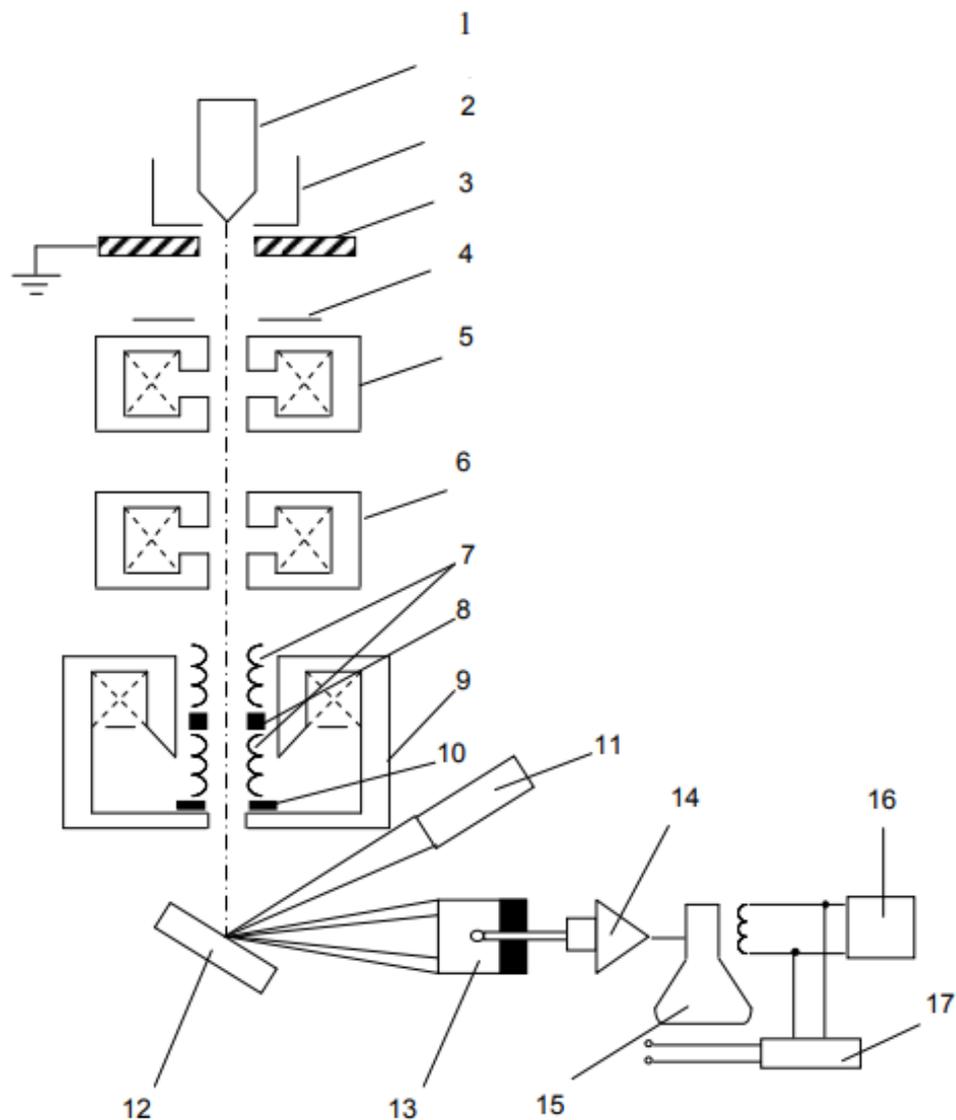


Рисунок 3 – Принципиальная схема растрового электронного микроскопа

Под номерами 1-3 изображена электронная пушка, которая состоит из катода 1, цилиндр Венельта 2 и анода 3. В системе есть две диафрагмы, они изображены под номерами 4 и 10. Под номерами 5,6,9 изображены электромагнитные линзы. Также на на линзе под номером 9 расположен стигматор 8. Внутри нее находятся две пары электромагнитных отклоняющих катушек 7. Системы, которые формируют изображение 11, 13-17 номера. Образец 12 фиксируется на предметном столике. Под номером 13 представлен один из возможных наборов тип детектора, который регистрирует вторичные электроны, после чего в детекторе поток электронов преобразуется в ток

(электрический сигнал). Номер 14 усилитель, моделирующий яркость экрана.  
Экран электронно-лучевой трубки 15, генератор 16.

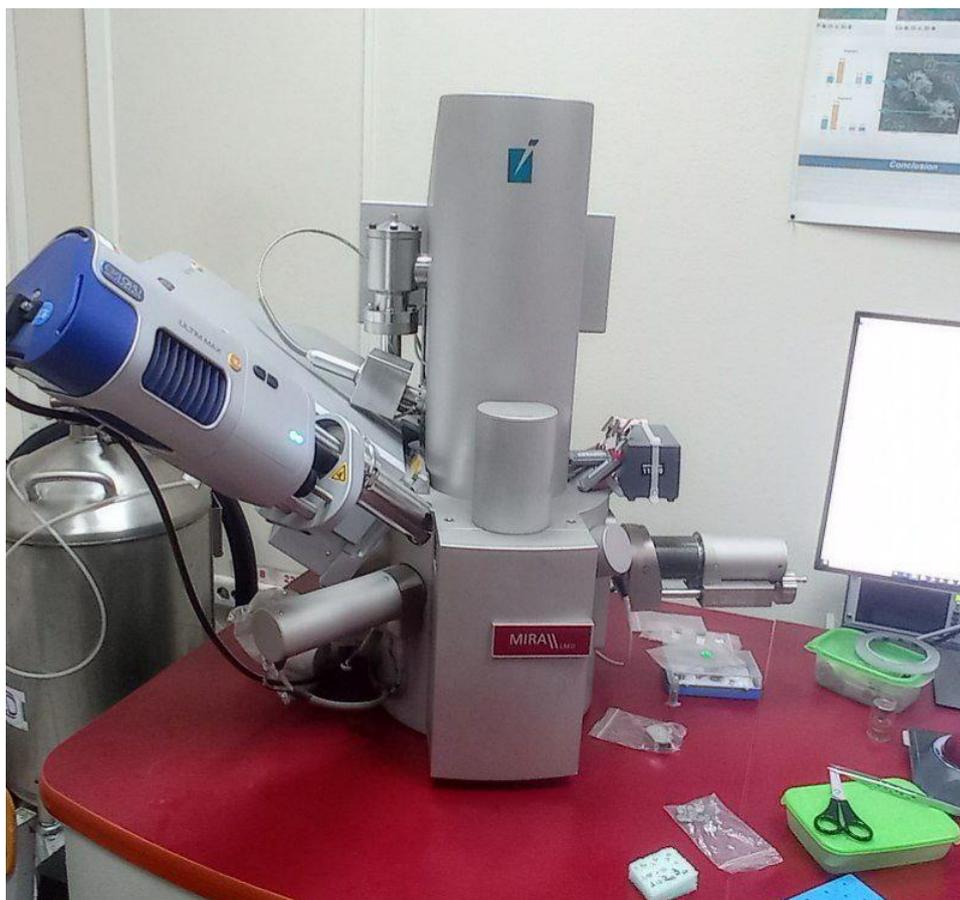


Рисунок 4 – Растровый электронный микроскоп TESCAN модели MIRA 2 LMU с приставкой для энергодисперсионного анализа фирмы OxfordInstruments

TESCAN MIRA – сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) четвертого поколения с катодом Шоттки, позволяющий получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN Essence™, что значительно упрощает получение данных как о морфологии поверхности образца, так и о его локальном элементном составе и делает СЭМ TESCAN MIRA эффективным аналитическим решением для проведения регулярного контроля качества материалов и изделий, анализа отказов и различных лабораторных исследований. Модернизированная колонна электронного микроскопа TESCAN MIRA управляется усовершенствованной электроникой, которая обеспечивает мгновенный переход от режима получения изображений при больших

увеличениях к режиму исследования элементного состава образцов без механической смены апертур или механической юстировки каких-либо элементов внутри колонны.

Установленные детекторы: SE – детектор вторичных электронов типа ЭТ (YAG кристалл); RBSE – выдвигаемый детектор отраженных электронов сцинтиляторного типа; InBeam – детектор вторичных электронов, встроенный в объективную линзу; TE – детектор «на просвет» (детектор прошедших электронов); CL – панхроматический катодолюминесцентный детектор, измерение поглощенного тока зонда, индикация касания, телекамера для обзора камеры образцов.

Современные РЭМ способны работать с различными типами образцов, включая как проводящие, так и непроводящие материалы. Дополнительное оборудование и аналитические приставки расширяют возможности метода, позволяя проводить дополнительные анализы и исследования.

Растровая электронная микроскопия является эффективным инструментом для обнаружения деталей и структур на поверхности образцов с невероятно высоким разрешением, что делает ее необходимым методом для многих исследовательских и промышленных задач [9].

### **Технические возможности РЭМ**

1. Непосредственно исследовать большие площади поверхностей на массивных образцах и даже деталях в широком диапазоне увеличений от 10 до 50000 и выше с достаточно высоким разрешением.

2. На РЭМ можно исследовать общий характер структуры всей поверхности объекта при малых увеличениях и детально изучить любой интересующий исследователя участок при больших увеличениях. При этом отпадает необходимость в разработке специальных прицельных методов. Переход от малых увеличений к большим на РЭМ осуществляется быстро и просто. Возможность быстрого изменения увеличения в процессе работы микроскопа от 10 до 50000 позволяет легко устанавливать полезное увеличение.

3. РЭМ имеет большую глубину фокуса, что позволяет наблюдать объемное изображение структуры с возможностью ее количественной оценки. Создаются условия прямого изучения структуры поверхностей с сильно развитым рельефом, например, изломов.

4. РЭМ обычно снабжен микроанализаторами химического состава, что позволяет получать более полную информацию о поверхности изделия [10].

### **1.6 Метод К ближайших соседей**

Метод К ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN) является одним из самых простых и понятных алгоритмов машинного обучения. Он используется для задач классификации и регрессии, но чаще всего применяется именно для классификации. Основная идея KNN заключается в том, что объект классифицируется на основе класса его ближайших соседей. Этот метод не требует обучения модели, что делает его особенно привлекательным для новичков в области машинного обучения.

KNN относится к категории ленивых алгоритмов, что означает, что он не строит явной модели во время обучения. Вместо этого он сохраняет все обучающие данные и использует их непосредственно для классификации новых объектов. Это делает KNN чрезвычайно гибким и простым в реализации, но также может привести к высоким вычислительным затратам при работе с большими наборами данных.

Метод К ближайших соседей работает по принципу "большинство голосов". Для классификации нового объекта алгоритм находит К объектов в обучающем наборе данных, которые находятся ближе всего к новому объекту. Затем новый объект классифицируется в тот класс, который является наиболее распространенным среди этих К соседей.

### **2.3 Исследование загрязненных образцов ткани на РЭМ**

Было взято несколько проб из смежных комнат, в которых иногда производился отстрел оружия. В одной комнате оружие отстреливали реже (далее комната № 1), в другой чаще (далее комната № 2). Контрольные образцы также необходимы для проведения компаративного анализа и определения

наличия характерных особенностей в образцах. Данная методика позволяет получить информацию о составе и структуре продуктов выстрела, что может быть полезно при расследовании происшествий или экспертизе. Все 10 образцов представлены на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 – Образцы из комнаты № 1



Рисунок 6 – Образцы из комнаты № 2

Аппликация (перенос) микроколичеств продуктов выстрела с исследуемого объекта на предметный столик с электропроводящим скотчем [11-13]. После взятия пробы необходимо подготовить образцы, пропустив их

через вакууматор с последующим напылением золота. Всего для работы были выбраны 4 образца. Подготовленные для анализа образцы представлены на рисунке 7



Рисунок 7 – Образцы с золотым напылением

Откалибровав микроскоп на образце кобальта, помещаем в микроскоп образцы из тира. Исследование начинается с анализа химического состава, а затем морфологии микрочастиц для определения наличия или отсутствия признаков, характерных для частичек продуктов выстрела. При анализе результатов элементного состава было удалено золото, нанесенное ранее и титан (он относится к красителям и мог входить в состав скотча, с помощью которого производили взятие образцов) [11].

Рассмотрим образец из комнаты № 2, он изображен на рисунке 8. На изображении выделены спектры (s1,s2...s8) предполагается, что в данных пробах будут найдены продукты выстрела. Было известно, что в комнате № 2 отстрел оружия производился чаще. На результатах анализа наглядно видно, что концентрация химических элементов входящих в состав продуктов

выстрела выше, чем в комнате № 1. В таблице 3 изложены результаты анализа в виде процентного содержания химического элемента в спектрах. Графическое изображение результатов анализа представлено на рисунке 9.

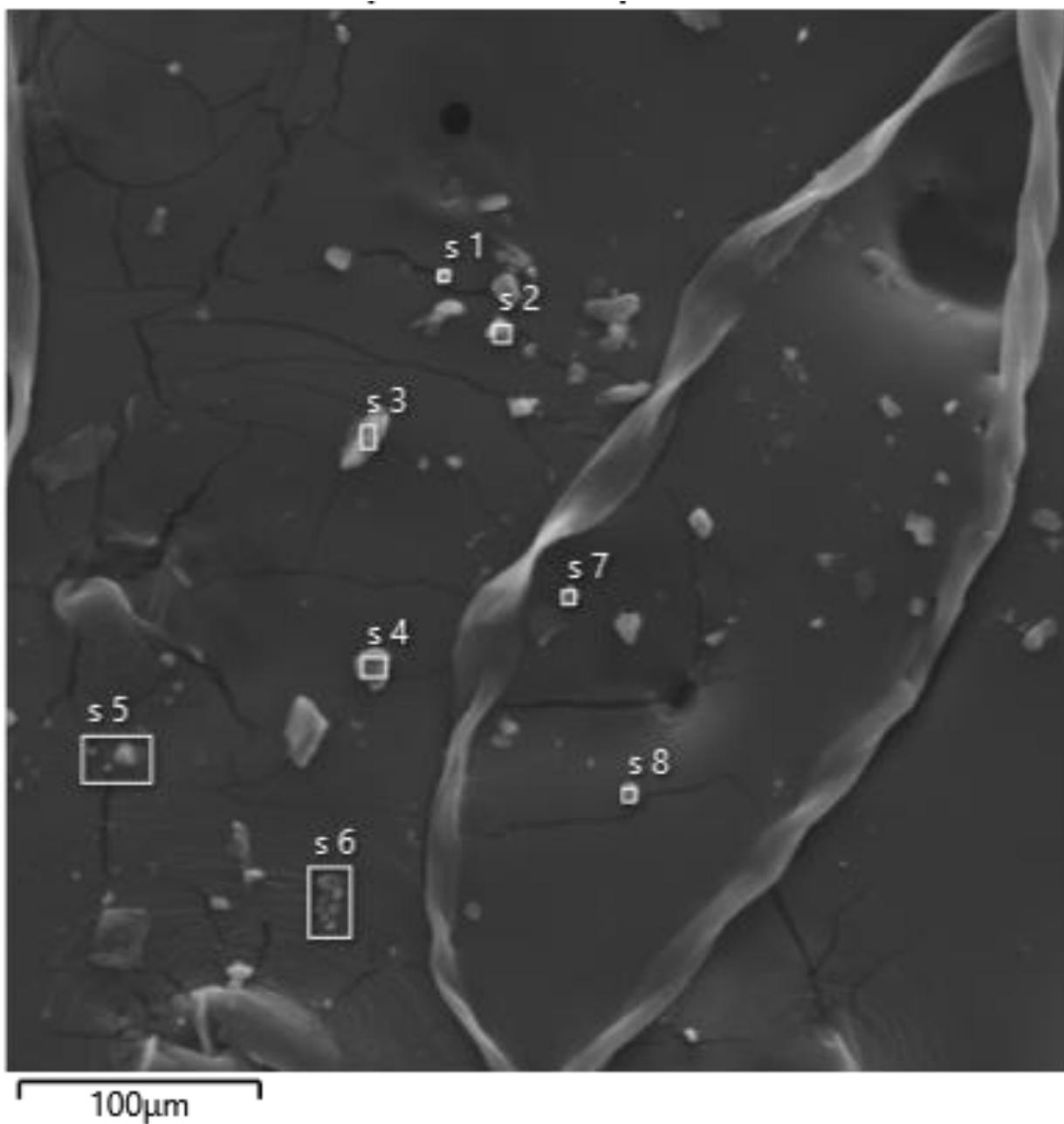


Рисунок 8 – Образец 1 комната № 2

Таблица 3 – Результаты химического элементного анализа исследуемых проб (s1, s2, ... s8)

Метка спектра	s 1	s 2	s 3	s 4	s 5	s 6	s 7	s 8
C	50.28	50.33	78.67	24.27	70.93	77.93	48.01	55.97
O	33.88	37.04	18.20	23.87	24.65	19.44	32.29	32.30
Na	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
Mg	0.13	0.03	0.09	0.00	0.11	0.00	0.25	0.08
Al	0.16	0.10	0.16	0.28	0.11	0.12	0.14	0.17
Si	0.53	11.52	0.23	0.81	3.64	0.20	0.33	10.85
S	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
Cl	0.00	0.02	0.70	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
K	0.03	0.04	0.29	0.00	0.00	0.53	0.00	0.03
Ca	14.06	0.05	0.64	0.09	0.11	0.00	18.36	0.03
Fe	0.05	0.06	0.13	49.22	0.04	0.04	0.00	0.20
Cu	0.20	0.14	0.32	0.39	0.15	0.30	0.28	0.11
Zn	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sb	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
Ba	0.14	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.29	0.37	0.38	0.59	0.24	1.25	0.00	0.26
Всего	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

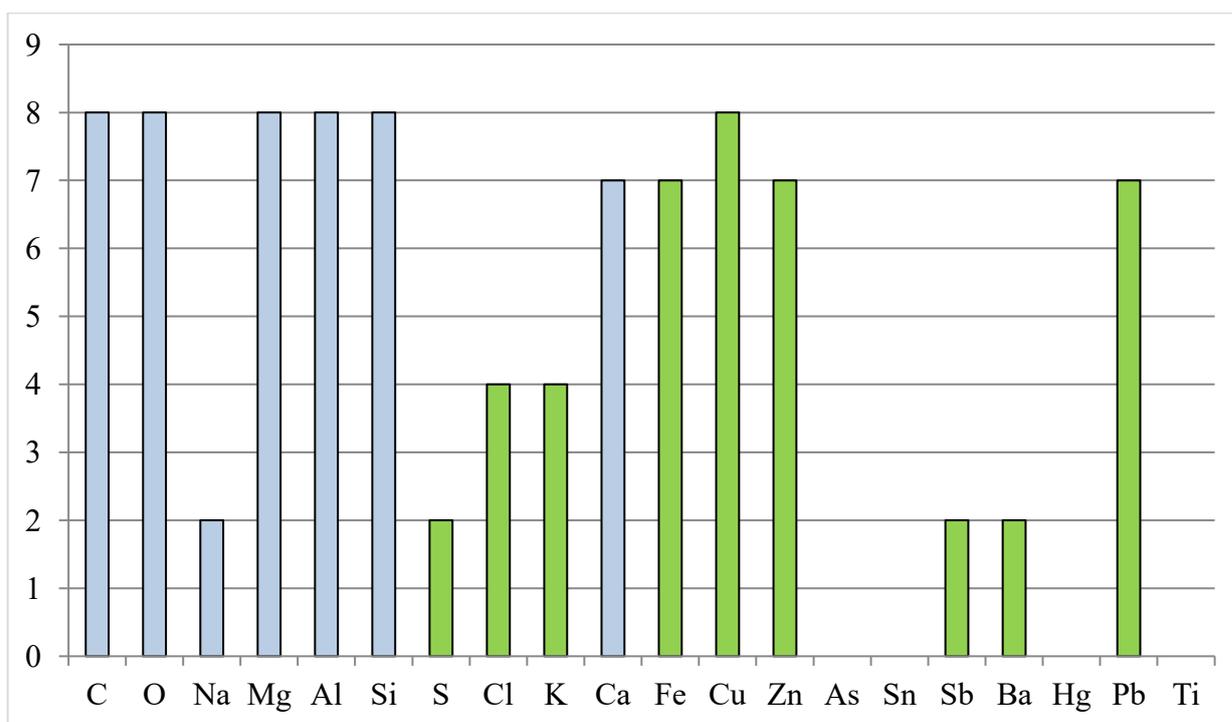
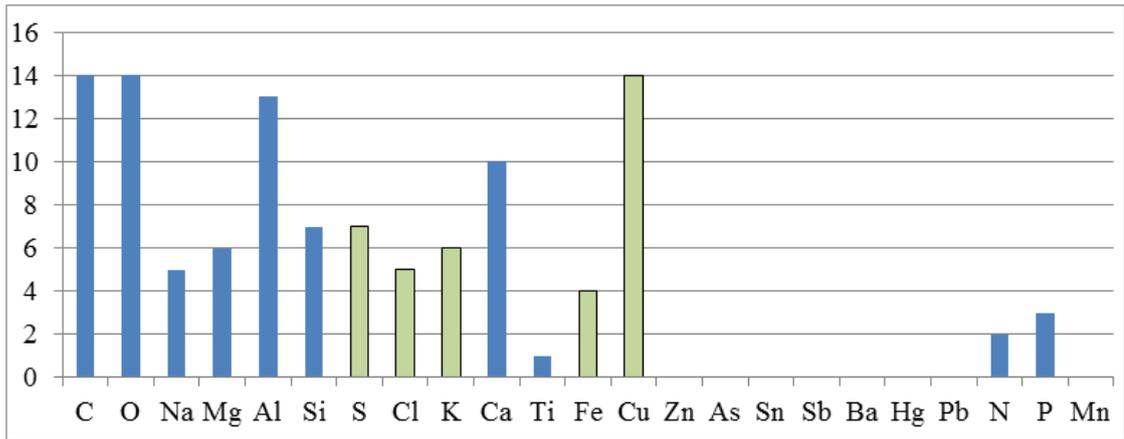


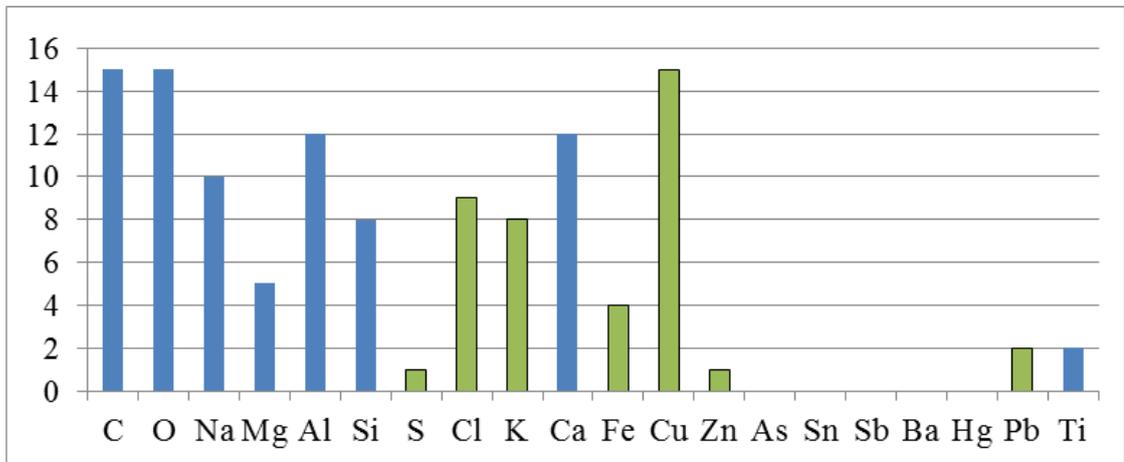
Рисунок 9 – Элементный состав продуктов выстрела

#### 2.4 Сравнительный анализ контрольных образцов

По результатам проведенных исследований были сформированы 4 столбчатые диаграммы (рисунок 10,11), которые наглядно показывают, что на образцах из комнат отстрела оружия были обнаружены такие химические элементы как Zn (цинк) и Pb (свинец) эти элементы являются яркими маркерами. Наличие в пробах таких элементов сигнализирует о присутствии в пробах характерных частиц веществ продуктов выстрелов. Однако, количественно обосновать категорические выводы о присутствии продуктов выстрела не представляется возможным, так как свинец и цинк присутствуют на уровне шумов.

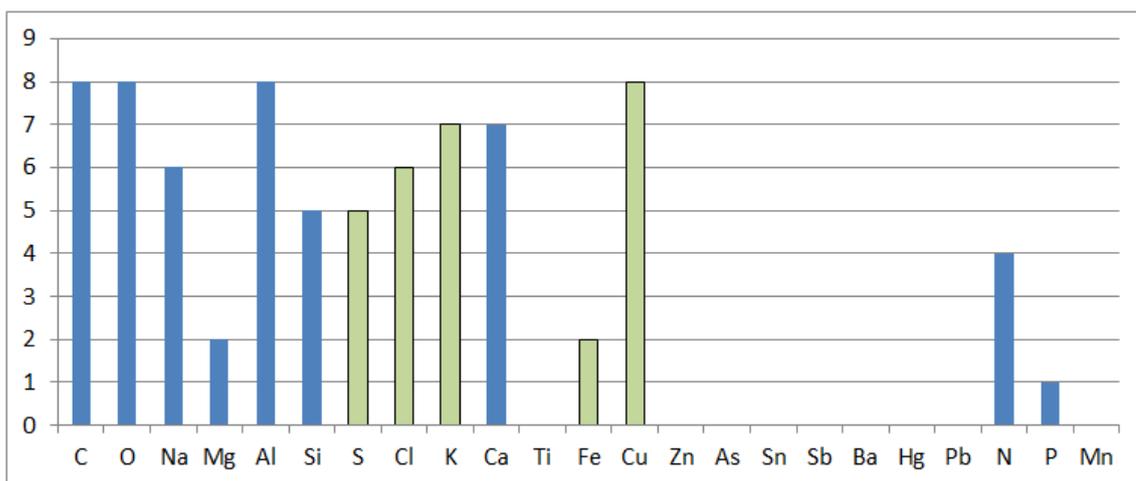


Контрольный образец 1 (2024 год)

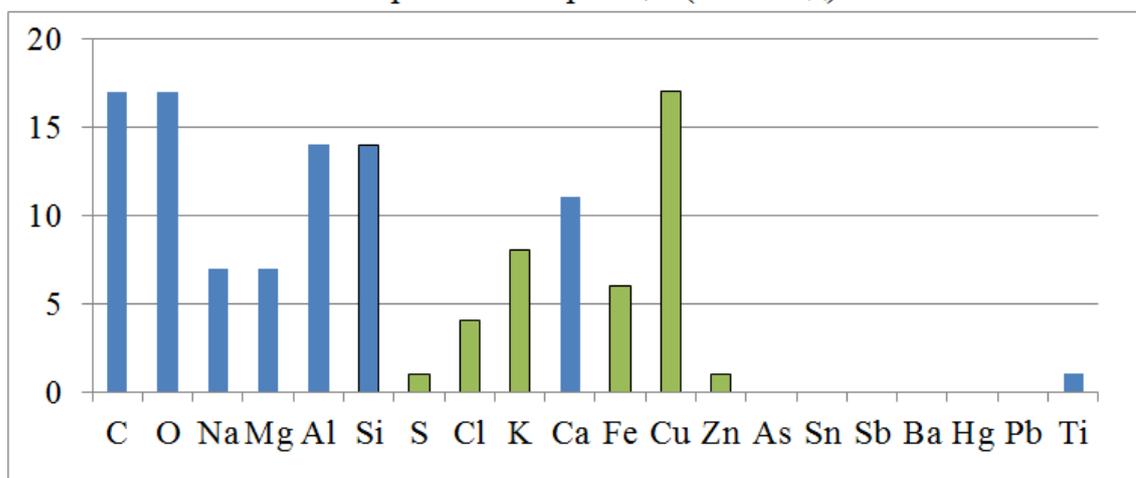


Контрольный образец 1 (2023 год)

Рисунок 10 – Сравнительный анализ элементного состава образцов



Контрольный образец 2 (2024 год)



Контрольный образец 2 (2023 год)

Рисунок 11 – Сравнительный анализ элементного состава образцов

При построении столбчатых диаграмм учитывается частота встречаемости различных химических элементов в исследуемых пробах. При этом не учитывается их вес (процентное содержание). Поэтому актуальным остается вопрос учета процентного содержания тех или иных элементов в пробах. Учет весов элементов позволит более точно проводить бинарную классификацию. Вторым нерешенным вопросом является оценка точности классификации, которая может служить количественным обоснованием категорических выводов. Для решения данных вопросов предлагается проводить дополнительный анализ спектров микрочастиц с помощью метода К-ближайших соседей [12-13].

### 3.2 Подготовка обучающей и тестовой выборки

Для дальнейшей работы необходимо подготовить обучающую и тестовую выборки. Были взяты данные по исследованиям образцов из комнаты отстрела оружия и из комнаты, в которой проводились занятия и окна которой выходили на оживленную улицу. На рисунке 12 изображен фрагмент обучающей и тестовой выборок. На рисунке представлены химические элементы (признаки), по которым будет производиться классификация. В качестве независимых переменных (признаков) выбраны следующие химические элементы: Fe, Cu, Sn, Sb, Ba, Pb. Такие элементы, как Fe и Cu характерны для покрытий оболочечных пуль, присутствие Sn обычно обусловлено оловянной прокладкой в капсюле, Pb свинец характерен для безоболочечных пуль и оржавляющих капсюльных составов, Sb и Ba определяются капсюльным составом. Обучающая выборка включает 210 спектров (объектов) химических элементов, а тестовая 90 спектров. Тестовая выборка формировалась путем случайного отбора 90 объектов из изначальной выборки, включающей 300 спектров. Оставшиеся 210 спектров формировали обучающую выборку. Число объектов разделилось поровну по классам 1 и 0 как в обучающей, так и тестовой выборках [14].

обучающая выборка 210 объектов								тестовая выборка 90 объектов							
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
Fe	Cu	Sn	Sb	Ba	Pb	класс		Fe	Cu	Sn	Sb	Ba	Pb	класс	
1,02	0,12	0	0,1	0,07	1,81	1		0,45	0,24	0,1	0,16	0	0,23	1	
0,47	0,14	0	0,1	0,46	1,75	1		0,07	0,63	10,27	5,04	0	0,44	1	
46,09	0,2	0	0	0	0,54	1		0,56	0,46	0,29	0,29	0	1,5	1	
1,2	0,23	0	0,28	17,1	1,64	1		0	0,88	0	0	0	25,03	1	
1,8	0,1	0	0	0,06	1,69	1		0	0,15	0	0	0,1	0,28	1	
1,35	0,27	5,2	2,17	0,33	2,61	1		0,06	0,35	0,16	0,07	0,1	0,49	1	
0,67	0,42	0	0	0,2	32,8	1		2,75	0,19	0	0	0	0,29	1	
0,5	0,05	0	0,04	0,03	0,89	1		0,31	0,85	0,17	0,12	0,14	1,77	1	
3,1	0,72	0	0	0	2,92	1		0,55	1,19	0	1,37	14,01	23,19	1	
1,12	0,08	0	0,09	2,36	1,14	1		1,78	0,6	0	0,26	0,16	7,83	1	
16,6	0,27	0	0,21	0,5	4,03	1		0	0,17	0	0	0	0	1	
5	0,14	0	0,08	0,15	1,7	1		0,4	0,12	0,1	0	0	0	1	
18,32	0,32	0	0,32	0,22	3,03	1		0,09	0,1	0	0	0,03	0,25	1	
0,2	0,16	0	0	0	0,43	1		0,09	0,22	0,07	0,05	0	0,75	1	
0,66	0,77	0	0,59	0	65,5	1		0,41	3,05	0,1	0,19	0	0,76	1	
1,25	0,68	0	0,3	0,17	48,97	1		0	0,56	0	0,05	0	0	1	
1,51	0,53	0,29	1,47	0	36,61	1		0	0,18	0	0	0	0,66	1	
1,58	0,12	0	0,08	0	1,71	1		0	0,12	0	0	0	0	1	
1,53	0,47	0	0,18	0,16	28,93	1		0,12	0,23	0	0	0	0,26	1	
0,64	0,16	3,23	5,56	0	3,88	1		0,04	0,24	0,17	0,11	0	0,37	1	
0,58	0,14	0	0,17	0	0,95	1		0,11	0,72	0,1	0	0	0,81	1	
5,97	0,17	0	0	0,13	2,11	1		0	0,18	0	0	0	0,17	1	
18,78	0,09	0	0	0	0,36	1		0,14	0,85	0,16	0,12	0	1,39	1	
0,21	0,11	0	0,07	0,1	4,35	1		0	0,47	0	0	0	0,66	1	
0,52	0,47	0	0	0,36	37,75	1		0,28	1,07	0	0,2	0	2,47	1	
15,9	0,27	0	0	0	2,48	1		0,09	0,29	0	0,1	0	0,92	1	

Рисунок 12 – фрагмент обучающей и тестовой выборок

### 3.3 Программная реализация алгоритма K-NN

Для реализации алгоритма машинного обучения K-ближайших соседей была разработана программа в среде Matlab. Условно ее можно разделить на 4 подпрограммы, каждая из которых решает свою подзадачу. Рассмотрим их по отдельности. Здесь представлены фрагменты еще не оптимизированного программного продукта.

Первая подпрограмма реализует загрузку данных из таблицы Excel:

```
clear all

% obuchaushaia vyborka
C=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'C2:C243'); % Fe
D=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'D2:D243'); % Cu
E=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'E2:E243'); % Sn
F=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'F2:F243'); % Sb
G=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'G2:G243'); % Ba
H=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'H2:H243'); % Pb
S=xlsread('/home/user/ racheti_Kulbachuk.xlsx',1,'I2:I243'); % klassi 1- sovpad, 0- nesovpad

% testovaya vyborka
c=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'K2:K101'); % Fe
d=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'L2:L101'); % Cu
e=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'M2:M101'); % Sn
f=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'N2:N101'); % Sb
g=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'O2:O101'); % Ba
h=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'P2:P101'); % Pb
s=xlsread('/home/user/racheti_Kulbachuk/MatLAB\Dannye_dlya_k_nn.xlsx',1,'Q2:Q101'); % klass
(1-sovpad, 0-nesovpad)

save('dannye','C','D','E','F','G','H','S','c','d','e','f','g','h','s') % sohraneniem obuch i testov vyborku
```

Как видно из текста программы из базы данных загружаются объекты, характеризующиеся 6 признаками (Fe, Cu, Sn, Sb, Ba, Pb). Обучающая выборка включает 210 объектов (спектров), а тестовая 90 объектов.

Затем следует подпрограмма перемешивания объектов обучающей и тестовой выборок и формирования новых подвыборок с усредненными по нескольким объектам признаками. Идея заключается в следующем. Для

уменьшения влияния случайных выбросов значений признаков отдельных объектов, на предварительном этапе проводилось сглаживание данных по скользящему среднему. Исходные выборки представляют собой наборы спектров, расположенных в случайном порядке. Это позволяет сформировать несколько подвыборок с по-разному перемешанными спектрами. Методика сглаживания данных по скользящему среднему представлена на рисунке 13. За счет этого в пространстве признаков формируются новые распределения новых объектов со сглаженными признаками. Предполагается, что это позволяет ослабить негативное влияние объектов с шумовыми выбросами признаков.

Программа проводит перемешивание спектров внутри каждого класса. Т.е. проводится отдельно перемешивание объектов первого класса и отдельно объектов класса 0.

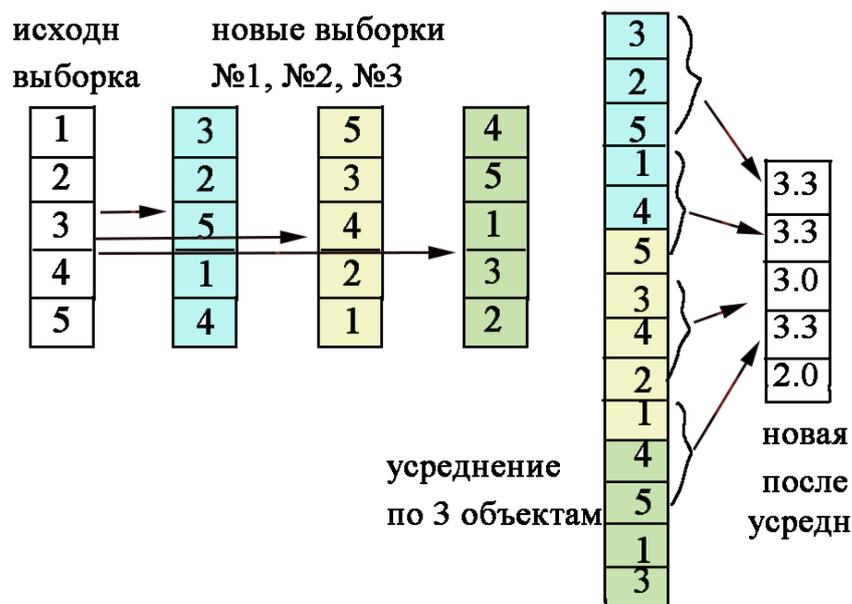


Рисунок 13 – Формирование новой выборки со скользящим средним

### Заключение.

В ходе выполнения практики были получены следующие результаты:

- Были изучены физико-химические процессы выстрела из огнестрельного оружия, взяты пробы из чистой комнаты и из комнаты отстрела оружия, сформирована обучающая и тестовая выборка спектров химических элементов частиц размером 1-20 мкм;

- Показано, что точность бинарной классификации спектров микрочастиц по категориям «частицы продуктов выстрела» и «частицы не относящиеся к продуктам выстрела», проведенной с помощью метода К-ближайших соседей, лежит в диапазоне: Accuracy=76-86%; Precision = 80- 100%; Recall = 64 — 80%;

- Показано, что основная ошибка обусловлена формированием ложно отрицательного прогноза. Поэтому при отрицательном прогнозе требуется дополнительное исследование, подтверждающее данный вывод;

- Для повышения точности прогнозов требуется увеличить обучающую выборку в несколько раз.

### **Список использованных источников**

1 Надеждин, С. В. Теоретические основы современных методов микроскопии / С. В. Надеждин, М. З. Федорова, В. А. Буржинская. – Белгород : БелГУ, 2008. – 123 с.

2 Россинская, Е. Р. Криминалистическое следование : курс лекций по криминалистике для слушателей следственного факультета / Е. Р. Россинская. – М. : Изд-во Норма, 1994. – 47 с.

3 Аверьянова, Т. В. Судебная экспертиза : курс общей теории / Т. В. Аверьянова. – М. : Изд-во Норма, 2006. – 272 с.

4 Лобачева, Г. К. Методы криминалистической экспертизы при исследовании веществ, материалов и изделий / Г. К. Лобачева. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2014. – 228 с.

5 Снеткова, В. А. Методики производства судебно-баллистических экспертиз / В. А. Снеткова. – М. : ВНИИСЭ, 2000. – 143 с.

6 Захаревич, А. М. Качественный анализ фонового содержания микрочастиц, характерных для продуктов выстрела / А. М. Захаревич, С. Б. Вениг // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2016. – № 2. – С 205-209.

7 Федоренко, В. А. Исследование продуктов дальнего выстрела с помощью растрового электронного микроскопа / В. А. Федоренко [и др.] //

Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2012. – № 3. – С. 72-75.

8 Россинская, Е. Р. Основы естественно-научных знаний для юристов : учебник / Е. Р. Россинская. – М. : Норма-Инфра М, 2000. – 428 с.

9 Пашкова, В. И. Лабораторные и специальные методы исследования в судебной медицине / В. И. Пашковой, В. В. Томилина. – Л. : Медицина. Ленинградское отделение [ЛО], 1975. – 456 с.

10 Микляева, О. В. Методы экспертного исследования следов выстрела / О. В. Микляева // Теория и практика судебной экспертизы: научно-практический журнал. – 2010. – № 2(18). – С. 162-165

11 Федоренко, В. А. Актуальные проблемы судебной баллистики: монография / В. А. Федоренко. – М. : Юрлитинформ, 2011. – 208 с.

12 Стальмахов, А. В. Судебная баллистика и судебно-баллистическая экспертиза : Курс лекций / А. В. Стальмахов, А. М. Сумарока, А. Г. Сухарев. – Саратов : СЮИ, 1998. – 169 с.

13 Демин, К. Е. Криминалистическая техника : учебник / К. Е. Дёмина. – М. : Юридический институт МИИТ, 2017. – 426 с.