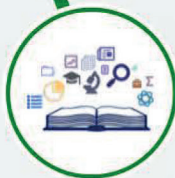




Наукові перспективи
Видавнича група

Перспективи та інновації науки



СЕРІЯ "ПЕДАГОГІКА"



СЕРІЯ "ПСИХОЛОГІЯ"



СЕРІЯ "МЕДИЦИНА"



№11(57) 2025

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського

Видавнича група «Наукові перспективи»

Луганський державний медичний університет

Громадська наукова організація «Система здорового довголіття в мегаполісі»

Християнська академія педагогічних наук України

Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з духовно-морального виховання

*за сприяння КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва", Центру
дієтології Наталії Калиновської*

«Перспективи та інновації науки»

(Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»)

Випуск № 11(57) 2025

Київ – 2025

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University

Publishing Group «Scientific Perspectives»

Luhansk State Medical University

Public scientific organization "System of healthy longevity in the metropolis"

Christian Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine

**All-Ukrainian Association of Teachers and Psychologists of Spiritual and
Moral Education**

*with the assistance of the KNP "Clinical Hospital No. 15 of the Podilsky District of Kyiv", Nutrition Center of
Natalia Kalinovska*

"Prospects and innovations of science"

(Series" Pedagogy ", Series" Psychology ", Series" Medicine ")

Issue № 11(57) 2025

Kyiv – 2025

ISSN 2786-4952 Online

УДК 001.32:1/3](477)(02)

DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-11\(57\)](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-11(57))

«Перспективи та інновації науки (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»)»: журнал. 2025. № 11(57) 2025. С. 3866



Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.09.2021 № 1017 журналу присвоєно категорію "Б" із психології та педагогіки

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.04.2023 № 491 журналу присвоєно категорію "Б" із медицини: спеціальність 222

Рекомендовано до видавництва Президією громадської наукової організації «Всеукраїнська Асамблея докторів наук з державного управління» (Рішення від 17.11.2025, № 6/11-25)

Журнал видається за підтримки КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва", Центру дієтології Наталії Калиновської.



Журнал заснований з метою розвитку наукового потенціалу та реалізації кращих традицій науки в Україні, за кордоном. Журнал висвітлює історію, теорію, механізми формування та функціонування, а, також, інноваційні питання розвитку медицини, психології, педагогіки та. Видання розраховано на науковців, викладачів, педагогів-практиків, представників органів державної влади та місцевого самоврядування, здобувачів вищої освіти, громадсько-політичних діячів. Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (IC), Research Bible, міжнародної пошукової системи Google Scholar.

Голова редакційної колегії:

**Жукова Ірина
Віталіївна**

кандидат наук з державного управління, доцент, Лауреат премії Президента України для молодих вчених, Лауреат премії Верховної Ради України молодим ученим, директор Видавничої групи «Наукові перспективи», директор громадської наукової організації «Всеукраїнська асамблея докторів наук з державного управління» (Київ, Україна)

Головний редактор: Чернуха Надія Миколаївна — доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри соціальної реабілітації та соціальної педагогіки Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна).

Заступник головного редактора: Торяник Інна Іванівна - доктор медичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник лабораторії вірусних інфекцій Державної установи «Інститут мікробіології та імунології імені І.І. Мечникова Національної академії медичних наук України» (Харків, Україна);

Заступник головного редактора: Сіданіч Ірина Леонідівна — доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри педагогіки, адміністрування і спеціальної освіти Навчально-наукового інституту менеджменту та психології ДЗВО «Університет менеджменту освіти» НАПН України (Київ, Україна);

Заступник головного редактора: Жуковський Василь Миколайович — доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри англійської мови Національного університету "Острозька академія" (Рівне, Україна).

Редакційна колегія:

1. Бабова Ірина Костянтинівна - доктор медичних наук, професор, старший науковий співробітник відділу економічного регулювання природокористування, ДУ "Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України", лікар ФРМ (фізичної та реабілітаційної медицини) ДУ "Територіальне медичне об'єднання МВС України по Одеській області" (Одеса, Україна)
2. Бабчук Олена Григоріївна — кандидат психологічних наук, доцент, завідувач кафедри сімейної та спеціальної педагогіки і психології Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського» (Одеса, Україна)
3. Бахов Іван Степанович — доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри іноземної філології та перекладу Міжрегіональної академії управління персоналом (Київ, Україна)
4. Балахтар Катерина Сергіївна - здобувач ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 053. Психологія, старший викладач кафедри іноземних мов в Національному університеті ім. О. О. Богомольця (Київ, Україна)
5. Бартенєва Ірина Олександрівна - кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри педагогіки Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського» (Одеса, Україна)
6. Біляковська Ольга Орестівна — доктор педагогічних наук, професор кафедри загальної педагогіки та педагогіки вищої школи Львівського національного університету імені Івана Франка (м. Львів, Україна)
7. Вадзюк Степан Нестерович - доктор медичних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, почесний академік Національної академії педагогічних наук України, завідувач кафедри фізіології з основами біотики та біобезпеки Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського України (Тернопіль, Україна)
8. Вовк Вікторія Миколаївна - кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки Державного університету ім. Станіслава Штища в Пилі (м. Пила, Польща)
9. Гвожджевський Сильвія — кандидат наук, Державна професійна вища школа ім. Якуба з Парадижу в Гожуві-Великопольському (Польща)
10. Гетманенко Людмила Миколаївна - старша викладачка кафедри природничо-математичної освіти і технологій Інституту післядипломної освіти Київського столичного університету імені Бориса Грінченка (Київ, Україна)

- Fomina L.V., Bondarchuk H.O.** 2625
RELATIONSHIP BETWEEN GUT MICROBIOTICS COMPOSITION AND ANTHROPOMETRIC INDICATORS OF OBESITY IN ADULTS: A LITERATURE REVIEW
- Karatieieva S.Yu.** 2637
DYNAMIC COMPARISON OF THE UPPER LIMBS LENGTH OF STUDENTS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
- Kozar O.M.** 2647
ACE GENE POLYMORPHISM AND ITS ASSOCIATION WITH DOPPLER, ULTRASOUND, AND CLINICAL PARAMETERS IN PREGNANCIES BEYOND 40 WEEKS
- Kyliushyk K.S.** 2657
BIOSAFETY OF THE NAIL TECHNICIAN'S WORKSPACE IN THE CONTEXT OF PREVENTING CONTACT DERMATITIS AND ALLERGIC REACTIONS
- Kyrychenko V.I., Kyrychenko Yu.V., Horodetska O.O., Dus S.V., Bandurka N.M.** 2672
MODERN ASPECTS OF REHABILITATION AFTER UPPER LIMB AMPUTATION
- Levkiv M.O., Ostrovskyi P.Yu., Zaliznyak M.S.** 2685
EXPERIMENTAL MODELS OF PERIODONTITIS IN ANIMALS
- Masliuk Yu.Yu.** 2696
STRUCTURAL AND FUNCTIONAL STATE OF THE MYOCARDIUM ACCORDING TO ECHOCARDIOGRAPHY IN HYPERTENSION PATIENTS RELATED TO CONCOMITANT CHRONIC CORONARY DISEASE AND FREQUENT PREMATURE VENTRICULAR CONTRACTIONS
- Patskan L.O., Pohoretska Kh.V.** 2706
MODERN ENDODONTIC PRINCIPLES: A NEW ERA IN TOOTH PRESERVATION
- Perebetiuk A.M., Hel A.P.** 2717
TRACE ELEMENT DEPOSITS FROM FIREARM SHOTS: MODERN APPROACHES TO DETECTION AND INTERPRETATION
- Ratsyborynska-Polyakova N.V., Chorna T.S.** 2727
PSYCHOEDUCATION AS A MEANS OF DEVELOPING SELF-CONTROL AND INCREASING STRESS RESISTANCE OF UKRAINIAN HIGHER EDUCATION STUDENTS
- Rovetska A.B., Kamyshna I.I., Pavlovych L.B.** 2738
CLINICAL REHABILITATION MANAGEMENT OF PAIN AND MOVEMENT DISORDERS IN PATIENTS WITH LUMBOSACRAL RADICULOPATHY

UDC 343.98:623.4:543.42

[https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-11\(57\)-2717-2728](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-11(57)-2717-2728)

Perebetiuk Anatolii Mykolayovych PhD, assistant of the department Forensic Medicine and Law, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya; Vinnytsia, <https://orcid.org/0000-0002-3745-268X>

Hel Andrey Pavlovych associate professor of the Department Forensic Medicine and Law, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya; Vinnytsia, <https://orcid.org/0000-0003-2612-4530>

TRACE ELEMENT DEPOSITS FROM FIREARM SHOTS: MODERN APPROACHES TO DETECTION AND INTERPRETATION

Abstract. Rising levels of firearm violence have become a critical public health issue worldwide, and their systemic impact contributes substantially to the costs borne by health care systems and criminal justice systems due to firearm-related deaths and injuries. Widespread civilian access to guns and marked regional variation in firearm violence create a strong and persistent need for reliable forensic tools to characterise weapons use in both criminal and non-criminal incidents. In this context, microelement gunshot residue (GSR) deposits are crucial for reconstructing shooting events and linking specific individuals or weapons to firearm incidents. The purpose of this article was to analyse recent literature on microelement deposits formed during firearm discharge and to review current approaches to their detection and forensic interpretation. A narrative review of articles indexed in Google Scholar from 2015 to the present was conducted using keywords related to firearms, residual shot components, elemental composition, X-ray fluorescence and spectrometric analysis, with inclusion criteria focusing on studies relevant to GSR examination. This paper outlines current approaches to characterising GSR as a complex, multicomponent system comprising inorganic and organic micrometre-sized particles released during propellant combustion, primer initiation, projectile–barrel interaction and gas dynamics around the shooter–target system. Conventional inorganic GSR, typically lead-based and commonly enriched with antimony and barium, is increasingly supplemented or replaced by more heterogeneous elemental compositions as a result of the introduction of lead-free primers and novel ammunition formulations, making pattern recognition less straightforward. SEM-EDX remains the workhorse for detecting GSR and classifying inorganic particles, but it is now complemented by high-resolution spectrometric techniques such as LA-ICP-MS, single-particle ICP-TOF-MS, ICP-OES and lead isotopic analysis, which together enable more detailed elemental and isotopic profiling of residues. Laser- and X-ray-induced fluorescence imaging techniques (LIBS, micro-XRF and MA-XRF) allow non-destructive, large-

area mapping of microelement deposits on clothing, surfaces and other substrates, improving visualisation of spatial patterns that inform on shot direction and shooting distance. Analysis of microelement signatures in combination with assessment of macroscopic and thermal damage to fabrics and biological substrates can greatly improve reconstruction of shooting events and differentiation between various firing distances and scenarios. However, the evidentiary value of GSR is limited by particle transfer and loss, environmental GSR-like backgrounds, variability in ammunition composition and differences in laboratory practice, all of which may affect the comparability and robustness of results used to interpret firearm discharge events. Overall, this review suggests that the effective forensic and medico-legal use of microelement GSR deposits is possible only when complex analytical workflows and multiple complementary methods are employed, underpinned by strict sampling, validation and quality control procedures. Further standardisation of analytical protocols, inter-laboratory comparison studies and development of clear interpretative guidelines are essential to strengthen the probative value of GSR evidence across diverse forensic applications.

Keywords: trace element deposits, firearm shot, residual components of the shot, spectral analysis, forensic examination, forensic research.

Перебетюк Анатолій Миколайович PhD, асистент кафедри судової медицини та права Вінницького національного медичного університету ім. М. І. Пирогова; м. Вінниця, <https://orcid.org/0000-0002-3745-268X>

Гель Андрій Павлович доцент кафедри судової медицини та права Вінницького національного медичного університету ім. М. І. Пирогова; м. Вінниця, <https://orcid.org/0000-0003-2612-4530>

МІКРОЕЛЕМЕНТНІ ВІДКЛАДЕННЯ ПРИ ПОСТРІЛАХ ІЗ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЯВЛЕННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ

Анотація. Зростання рівня насильства із застосуванням вогнепальної зброї стало критичною проблемою громадського здоров'я в усьому світі, а його системний вплив істотно збільшує витрати систем охорони здоров'я та кримінального правосуддя через смертельні та несмертельні вогнепальні ураження. Широка доступність зброї серед цивільного населення та виражені регіональні відмінності у рівнях вогнепального насильства зумовлюють стійку потребу в надійних судово-експертних інструментах для характеристики застосування зброї як у кримінальних, так і в некримінальних інцидентах. У цьому контексті мікроелементні відкладення залишків пострілу (gunshot residue, GSR) мають ключове значення для реконструкції обставин стрілянини та встановлення зв'язку конкретних осіб або зразків зброї з фактами її застосування.

Метою цієї статті було проаналізувати сучасну літературу щодо мікроелементних відкладень, що утворюються під час пострілу з вогнепальної зброї, та узагальнити сучасні підходи до їх виявлення й судово-експертної інтерпретації. Проведено наративний огляд статей, індексованих у базі Google Scholar у період із 2015 року до теперішнього часу, з використанням ключових слів, пов'язаних із вогнепальною зброєю, залишковим компонентом пострілу, елементним складом, рентгенівською флуоресценцією та спектрометричним аналізом, з включенням лише тих досліджень, які були релевантні до вивчення GSR. У роботі узагальнено сучасні підходи до характеристики GSR як складної, багатокомпонентної системи, що включає неорганічні та органічні мікрометрові частинки, які вивільняються під час горіння металюного заряду, ініціації капсуля, взаємодії кулі зі стволом та газової динаміки навколо системи «стрілець – ціль». Класичний неорганічний GSR, як правило, має свинцеву основу та збагачений сурмою й барієм, проте дедалі частіше доповнюється або заміщується більш різноманітними елементними композиціями внаслідок упровадження безсвинцевих капсулів і нових форм боєприпасів, що ускладнює однозначне розпізнавання типових схем. SEM-EDX і надалі залишається основним інструментом для виявлення GSR та класифікації неорганічних частинок, але нині його доповнюють високочутливі спектрометричні методи, такі як LA-ICP-MS, single-particle ICP-TOF-MS, ICP-OES і ізотопний аналіз свинцю, які у сукупності забезпечують більш деталізоване елементне й ізотопне профілювання відкладень. Лазерно- та рентген-індуковані флуоресцентні методи візуалізації (LIBS, micro-XRF та MA-XRF) дають змогу нешкодливо, на великих площах картувати мікроелементні відкладення на одязі, поверхнях та інших носіях, покращуючи візуалізацію просторових патернів, інформативних щодо напрямку пострілу та дистанції стрільби. Аналіз мікроелементних «підписів» у поєднанні з оцінкою макроскопічних і термічних ушкоджень тканин та біологічних субстратів суттєво підвищує точність реконструкції подій стрілянини й дає змогу краще диференціювати різні дистанції та сценарії пострілу. Водночас доказове значення GSR обмежується механізмами переносу й втрати частинок, наявністю у довкіллі фонового GSR-подібного матеріалу, варіабельністю складу боєприпасів і відмінностями лабораторної практики, що може впливати на порівнюваність і надійність результатів, використаних для інтерпретації фактів пострілу. Загалом огляд свідчить, що ефективне застосування мікроелементних відкладень GSR у судово-медичній та криміналістичній практиці можливе лише за умови використання комплексних аналітичних схем і кількох взаємодоповнювальних методів, які спираються на суворі протоколи відбору проб, валідації та контролю якості. Подальша стандартизація аналітичних протоколів, міжлабораторні порівняльні дослідження та розробка чітких інтерпретаційних настанов є необхідними для підсилення доказової цінності GSR у різноманітних судово-експертних контекстах.

Ключові слова: мікроелементні відкладення, постріл із вогнепальної зброї, залишкові компоненти пострілу, спектральний аналіз, судово-медична експертиза, криміналістичні дослідження.

Statement of the problem. Firearm injuries have become a leading cause of premature death worldwide in recent decades. Across the globe, hundreds of thousands of people – up to nearly one million per year – die or are injured as a result of firearm use, and in some regions deaths from firearms account for a substantial share of violent mortality. The high prevalence of firearm-associated deaths in many settings is driven by the widespread availability of both civilian and service weapons and by inadequate systems for controlling their circulation and preventing violence [1].

More recent estimates of the global burden of firearm violence across 204 countries and territories for the period 1990–2019 have revealed marked regional differences in both mortality levels and temporal trends. In several countries, fatal firearm violence rates remain high, with little change or even an increase in non-fatal firearm assaults, whereas other settings have experienced favourable trends following the introduction of stricter legislation and/or community safety programmes. Of particular concern is the rising proportion of cases linked to interpersonal violence and criminal acts, which creates an ongoing need for reliable forensic tools to detect and document firearm use [2].

Despite its scale, firearm violence has long been under-recognised as a global health issue. The review by Werbeck et al. demonstrated that firearm injuries contribute substantially to the overall burden of disease and disability, disproportionately affecting low- and middle-income countries and marginalised population groups. The authors emphasise that, in the absence of a systematic approach to data collection, prevention and post-incident response – including high-quality forensic and medico-legal support – the impact of firearm trauma on health and justice systems may be even more severe [3].

Gun violence, in particular, would not reach such levels without the vast number of firearms in civilian hands. According to Small Arms Survey estimates, hundreds of millions of privately owned firearms worldwide are likely to be unregistered. This excessive number of weapons creates a critical risk of both intentional and unintentional use, complicates control over their movement and distribution, and simultaneously increases the demands placed on forensic methods that enable documentation of the shot, determination of the type of weapon used and its evidentiary linkage to a specific individual [4].

Brazil is a country with exceptionally high firearm-related mortality. A Global Burden of Disease–based analysis showed that, from 1990 to 2017, firearms were among the most important determinants of violent deaths in this country and had a significant impact on life expectancy, especially among young and middle-aged men. High levels of firearm homicides and the intersection of organised crime, social inequality and widespread availability of weapons create a particularly complex situation for health care and forensic services [5].

Although overall firearm violence rates in the European region are relatively low compared with many other parts of the world, the systematic review by Krüsselmann et al. shows that gun crime and associated fatalities remain a significant public safety concern. Patterns of incidents differ between European countries: in some, homicides and attempted homicides involving firearms predominate, while in others suicides committed with firearms are more frequent. This obliges forensic medical and criminalistics departments to be prepared for high-standard collection, analysis and interpretation of gunshot evidence across a wide range of crime and incident scenarios [6].

The situation in the United States, where levels of civilian gun ownership are particularly high, also merits special attention. As reported by Kegler et al., firearm homicide and suicide rates increased in the USA during 2019–2020, with the most pronounced rises seen in specific racial/ethnic and age groups. This situation highlights not only the need for preventive measures but also the importance of advancing medico-legal techniques to accurately document every event involving firearms, including the examination of microtraces from gunshots [7].

Of particular concern is the growing role of firearm injuries as a leading cause of death among children and adolescents. Goldstick et al. reported that, in the United States, firearms have surpassed motor vehicle crashes as the leading cause of death among those aged 15–19 years, reflecting rising rates of fatal violence, accidental shootings and suicides with firearms in young people. This calls for increased attention from health care systems and law enforcement agencies to the quality of documentation and the thoroughness of investigation in all cases where firearm use is suspected [8].

Against this background, firearm injuries are increasingly being regarded by many authors primarily as a preventable public health problem. Patel et al. stress that the majority of firearm injuries are avoidable, provided that action is taken at multiple levels – legal, social and medical. The medical and forensic components include not only clinical care for the injured, but also the development and application of highly sensitive laboratory techniques for detecting and analysing gunshot residue (GSR), which allow a more complete reconstruction of incident circumstances and enhance the evidentiary value of case material [9].

There is strong evidence that the legal and regulatory environment has a significant impact on the level of firearm injuries and crime. The review by Santaella-Tenorio et al. found that stricter firearm legislation, background checks for prospective purchasers and limits on access to certain types of firearms are associated with reductions in firearm homicides, suicides and accidental shooting deaths. At the same time, the effectiveness of such measures largely depends on the quality of their implementation and on the strength of the evidentiary base in each specific case involving firearm use, which includes the results of forensic medical and ballistic examinations [10].

In view of the extensive spread of firearms worldwide, the substantial mortality and injury burden and the growing reliance on legal control mechanisms, there is an increasing need for robust procedures to detect and interpret traces resulting from

gunfire. Microelement deposits formed as a consequence of a shot (on skin, clothing and surrounding objects) constitute an important source of information regarding the fact and circumstances of firearm use, the type of ammunition and the possible involvement of specific individuals. The development of modern analytical techniques for qualitative and quantitative characterisation of these deposits provides new opportunities to improve the accuracy of forensic conclusions. In this context, summarising current approaches to the detection and interpretation of microelement-containing gunshot deposits is of particular interest and constitutes the main aim of this article.

The purpose of the article – to analyze the literature on modern methods for analyzing residual components of a shot remaining after the use of a firearm.

Research objects and methods. Publications were analyzed using the following keywords: firearms, residual shot component, elemental composition, X-ray fluorescence spectroscopy, spectrography, and others related to the topic of the article. The Google Academy scientometric database was selected for the search, with the search filter set to "since 2015".

Presentation of the main material.

Research results and their discussion. Review of modern literature indicates that the residual fraction of a shot, known as gunshot residue (GSR), should be regarded as a complex multicomponent system of inorganic and organic micrometric particles generated by propellant combustion, primer initiation, friction between the bullet and barrel, and interaction of gases with adjacent objects. Classical GSR generally consists of particles enriched in lead, antimony and barium, as well as elements derived from the bullet jacket and cartridge case; however, the shift towards lead-free primers and new forms of ammunition has significantly complicated the interpretation of elemental profiles. The review by Shrivastava and co-authors demonstrates that up-to-date GSR detection procedures include not only traditional SEM-EDX, but also a wide variety of spectrometric and imaging techniques, which permit confirmation of the shooting event and much more detailed analysis of its elemental signature [11].

The analytical chemistry of propellant and GSR is currently carried out with explicit consideration of the organo-inorganic nature of GSR produced by modern ammunition systems. Serol et al. highlight the potential of organic material in propellant – stabilisers, plasticisers and energetic compounds – as discriminatory markers for cartridge type and manufacturer, whereas inorganic microdeposits are characteristic of the primer, cartridge case and projectile [12]. As described by Taudte et al., the use of mass spectrometry in GSR investigation offers simultaneous and highly sensitive analysis of a broad range of elements and organic compounds, particularly when traditional lead–antimony–barium markers are absent or have limited diagnostic value [13].

Another important dimension of the discussion concerns not only the technical capabilities and limitations of these techniques, but also their evidential power in casework. Minzière et al. emphasise that GSR may be extremely informative for

determining the fact of firing, shooting distance and the spatial relationship between shooter and victim; nevertheless, interpretation in court is challenging and requires consideration of particle transfer, secondary contamination and the background presence of GSR-like particles. The authors argue that standardised procedures for sampling, storage, analysis and interpretation of microelement deposits are essential to minimise the risk of both false-negative and false-positive conclusions [14].

A promising direction in method development is the application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for spatially resolved examination of GSR and GSR-like material. The study by de Souza Ferreira and colleagues shows that imaging of elemental distributions on biological and non-biological surfaces allows real GSR particles to be distinguished from background dust or other anthropogenic particles with similar elemental composition, and makes it possible to draw conclusions about the morphology and localisation of deposits within the shooting region [15]. Abrego et al. further demonstrate that scanning laser ablation ICP-MS permits direct elemental characterisation of individual GSR particles, which aids in confidently differentiating them from GSR-like grains and increases the probative value of the results [16].

At the same time, laser-ablation methods offer opportunities not only to examine traces on clothing or skin, but also to support identification of persons on the basis of GSR present in latent fingerprints. Pluháček et al. showed that LA-ICP-MS imaging of fingerprints enables simultaneous acquisition of dactyloscopic and chemical information in a single measurement: this technique can visualise the ridge pattern superimposed on the locations where microelement deposits are situated [17]. Brünjes et al. expand this approach by using single-particle ICP-TOF-MS for rapid analysis of individual GSR particles, a format that facilitates high-throughput acquisition of multi-element signatures for large numbers of particles, which is essential in routine casework with substantial sample loads [18].

The integration of multiple spectrometric techniques is also evident in the work by Vander Pyl and co-workers, who reported combined analysis of primer GSR particles using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and LA-ICP-MS. LIBS allows rapid, relatively inexpensive screening of particles based on elemental composition with minimal sample preparation, whereas LA-ICP-MS can refine quantitative elemental ratios and provide more comprehensive results [19]. In this context, micro-X-ray fluorescence (micro-XRF) studies show that this method is suitable for the characterisation of small particles from different sources, including GSR, offering microelement analysis in a nearly non-destructive imaging mode [20].

The potential for exploring microelement deposits is further enhanced by large-area imaging of forensic objects using MA-XRF (macro X-ray fluorescence). Langstraat et al. demonstrated that MA-XRF is capable of large-area scanning of items such as clothing to identify the localisation of elements characteristic of GSR and to create a “map” of shot-related residues across an entire object [21]. Berendes et al. found that m-XRF is a useful technique for the examination of clothing and other

materials as an alternative method for studying GSR patterns on fabrics and objects, enabling non-contact determination of the structure and intensity of microelement deposits, and thereby aiding in the analysis of trace configurations and, importantly, in determining both the direction and distance of the shot [22].

Although new analytical methods are being developed, SEM-EDX remains the current “gold standard” for inorganic GSR analysis. Brožek-Mucha and Klag seek to optimise automated GSR particle analysis by SEM-EDX, from the use of synthetic particle standards to the selection of parameter sets suitable for rapid daily casework. The authors emphasise that careful standardisation of scanning parameters, signal-intensity thresholds and particle classification criteria can shorten analysis time without loss of specificity or sensitivity [23].

The shift from conventional leaded to lead-free primers has altered the elemental “signature” of GSR and prompted experts to develop new approaches for interpreting microelement deposits. Szakas et al. demonstrated that elemental compositions of leaded and lead-free primers can be discriminated using ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry) in combination with multivariate statistical analysis (PCA), indicating that multicomponent elemental profiles may be used to differentiate between ammunition types and, potentially, the origins of GSR [24]. Building on this, Guo et al. showed that lead isotopic analysis of primer GSR can not only corroborate the link between a particular cartridge and residues on an item, but also provide source-specific isotope ratios that are informative for evidentiary questions in forensic applications [25].

It is essential to stress that the outcomes of high-tech microelement investigations should be integrated with data on macroscopic and thermal damage occurring at the time of the shot. The study by Gunas et al. on fire damage to cotton fabrics during close-range firing at a human torso model with a Fort-12RM pistol made it possible to characterise specific burn and mechanical injuries to the fabric, as well as the distribution of combustion products over its surface [26]. These studies show that diagnostics of the shooting zone must be based on comprehensive analysis that takes into account damage morphology, the configuration of microelement deposits and the results of instrumental examinations. In this regard, the work by Mikhailenko et al. on determining the elemental composition of metals and their topography in biological objects using spectrometers illustrates the potential for applying similar technologies to an integrated assessment of GSR on biological substrates (skin, soft tissues, bone), which is especially important for forensic medical examination of firearm injuries [27].

In conclusion, the residual component of a shot is currently regarded as a highly distinctive yet intrinsically complex object of study that can only be fully elucidated through the combination of traditional microscopic techniques (SEM-EDX) with state-of-the-art spectrometric and imaging methods (LA-ICP-MS, single-particle ICP-TOF-MS, LIBS, micro-/MA-XRF and isotopic analysis. The use of both multi-element and isotopic approaches, improvement of automated data-processing algorithms and integration of chemical analysis with macro- and microscopic assessment of damage

substantially increase the precision of detection and interpretation of gunfire-related trace element deposits. At the same time, the diversity of ammunition compositions, changes in the weapons market, environmental sources of GSR-like backgrounds and inter-laboratory variation remain major sources of variability, underscoring the need for further standardisation of protocols, inter-laboratory comparisons and the development of clear interpretative criteria before microelement gunshot deposits can be used robustly as an evidential tool in forensic medical and criminalistic practice.

Conclusions. According to this review, GSR is a highly complex, multicomponent system that can be confidently detected and properly interpreted only when classical SEM-EDX is used in combination with modern spectrometric and imaging techniques. Approaches that combine multi-element and isotopic determination (LA-ICP-MS, single-particle ICP-TOF-MS, LIBS and micro/MA-XRF) greatly enhance the sensitivity and specificity of GSR analysis, particularly in light of varying primer compositions and the increasing use of lead-free ammunition. Combining microelement profiling with the assessment of macroscopic and thermal damage on clothing and biological material substantially improves the reconstruction of shooting events and increases the probative value of expert conclusions. However, variability in ammunition, environmental GSR-like backgrounds and inter-laboratory differences emphasises the need for strict standardisation of protocols, inter-laboratory validation and clear interpretative criteria for the robust application of microelement GSR deposits in forensic and medico-legal practice.

References

1. Naghavi, M., Marczak, L. B., Kutz, M., et al. (2018). Global mortality from firearms, 1990–2016. *JAMA*, 320(8), 792–814.
2. Ou, Z., Ren, Y., Duan, D., Tang, S., Zhu, S., Feng, K., ... Wang, Z. (2022). Global burden and trends of firearm violence in 204 countries/territories from 1990 to 2019. *Frontiers in Public Health*, 10, 966507.
3. Werbick, M., Bari, I., Paichadze, N., & Hyder, A. A. (2021). Firearm violence: A neglected “Global Health” issue. *Globalization and Health*, 17(1), 120.
4. Karp, A. (2018). Estimating global civilian-held firearms numbers. Small Arms Survey Briefing Paper. Geneva: Small Arms Survey.
5. Malta, D. C., Soares Filho, A. M., Pinto, I. V., Minayo, M. C. de S., Lima, C. M., Machado, Í. E., ... Naghavi, M. (2020). Association between firearms and mortality in Brazil, 1990 to 2017: A Global Burden of Disease Brazil study. *Population Health Metrics*, 18(Suppl 1), 19.
6. Krüsselmann, K., Aarten, P. G. M., & Liem, M. (2021). Firearms and violence in Europe: A systematic review. *PLOS ONE*, 16(4), e0248955.
7. Kegler, S. R., Stone, D. M., & Holland, K. M. (2022). Vital signs: Changes in firearm homicide and suicide rates — United States, 2019–2020. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 71(19), 656–663.
8. Goldstick, J. E., Cunningham, R. M., & Carter, P. M. (2022). Current causes of death in children and adolescents in the United States. *New England Journal of Medicine*, 386(20), 1955–1956.
9. Patel, J., Leach-Kemon, K., Curry, G., Naghavi, M., & Sridhar, D. (2022). Firearm injury—A preventable public health issue. *The Lancet Public Health*, 7(11), e976–e982.

10. Santaella-Tenorio, J., Cerdá, M., Villaveces, A., & Galea, S. (2016). What do we know about the association between firearm legislation and firearm-related injuries? *Epidemiologic Reviews*, 38(1), 140–157.
11. Shrivastava, P., Jain, V. K., & Nagpal, S. (2021). Gunshot residue detection technologies—a review. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 11, 11.
12. Serol, M., Ahmad, S. M., & Família, C. (2023). Chemical analysis of gunpowder and gunshot residues. *Molecules*, 28(14), 5550.
13. Taudte, R. V., Beavis, A., Blanes, L., Cole, N., Doble, P., & Roux, C. (2014). Detection of gunshot residues using mass spectrometry. *BioMed Research International*, 2014, 965403.
14. Minzière, V. R., Gassner, A.-L., Gallidabino, M., Roux, C., & Weyermann, C. (2023). The relevance of gunshot residues in forensic science. *WIREs Forensic Science*, 5(2), e1472.
15. de Souza Ferreira, I. M., Braz, B. F., da Silva, L., Luna, A. S., & Santelli, R. E. (2021). Gunshot residue and gunshot residue-like material analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry imaging. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 177,
16. Abrego, Z., Grannis, N., Wetzel, S. J., & McCord, B. R. (2012). Unambiguous characterization of gunshot residue particles using scanning laser ablation and inductively coupled plasma–mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 84(5), 2402–2409.
17. Pluháček, T., Balínová, P., Louška, J., & Rychlovský, P. (2018). Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry imaging: A personal identification based on a gunshot residue analysis on latent fingerprints. *Analytica Chimica Acta*, 1032, 30–39.
18. Brünjes, R., Schüürman, J., von der Kammer, F., Hofmann, T., & Schäfer, J. (2022). Rapid analysis of gunshot residues with single-particle inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *Forensic Science International*, 332, 111202.
19. Vander Pyl, C., Bluett, J., Buszka, M., & MacCuspie, R. I. (2021). Analysis of primer gunshot residue particles by laser-induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 146(17), 5442–5454.
20. Miller, T. C., DeWitt, H. L., & Havrilla, G. J. (2005). Characterization of small particles by micro X-ray fluorescence. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 60(10–11), 1458–1467.
21. Langstraat, K., Knijnenberg, A., Edelman, G., van de Merwe, L., van Loon, A., Dik, J., & van Asten, A. C. (2017). Large area imaging of forensic evidence with MA-XRF. *Scientific Reports*, 7, 15056.
22. Berendes, A., Neimke, D., Schumacher, R., & Wennig, R. (2006). A versatile technique for the investigation of gunshot residue patterns on fabrics and other surfaces: m-XRF. *Journal of Forensic Sciences*, 51(5), 1085–1090.
23. Brožek-Mucha, Z., & Klag, I. (2024). Optimizing the automated analysis of inorganic gunshot residue particles by SEM-EDX: From synthetic particle standards to more time-efficient settings for daily casework. *Quantum Beam Science*, 8(4), 28.
24. Szakas, S. E., de Souza Ferreira, I. M., Braz, B. F., & Santelli, R. E. (2023). Elemental characterization of leaded and lead-free primers by inductively coupled plasma optical emission spectrometry and principal component analysis. *Applied Spectroscopy*, 77(2), 152–165.
25. Guo, H., Liu, J., Li, Y., Xu, L., & Yang, J. (2023). Lead isotope measurement of primer gunshot residues and its application in forensic science. *Journal of Forensic Sciences*, 68(2), 638–646.
26. Gunas, V., Bobkov, P., Plakhotniuk, I., Olhovenko, S., & Solonyi, O. (2021). Specifics of fire damage to cotton clothing while shooting point-blank at a human torso simulator from a Fort-12RM pistol. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 23(1), 175–187.
27. Mikhailenko, O. V., Roshchin, H. H., Dyadik, O. O., Irkin, I. V., Malisheva, T. A., Kostenko, Y. Y., ... & Hel, A. P. (2021). Efficiency of determination of elemental composition of metals and their topography in objects of biological origin using spectrometers. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology*, 15(1), 1278–1284.

Література

1. Naghavi, M., Marczak, L. B., Kutz, M., et al. (2018). Global mortality from firearms, 1990–2016. *JAMA*, 320(8), 792–814.
2. Ou, Z., Ren, Y., Duan, D., Tang, S., Zhu, S., Feng, K., ... Wang, Z. (2022). Global burden and trends of firearm violence in 204 countries/territories from 1990 to 2019. *Frontiers in Public Health*, 10, 966507.
3. Werbick, M., Bari, I., Paichadze, N., & Hyder, A. A. (2021). Firearm violence: A neglected “Global Health” issue. *Globalization and Health*, 17(1), 120.
4. Karp, A. (2018). Estimating global civilian-held firearms numbers. Small Arms Survey Briefing Paper. Geneva: Small Arms Survey.
5. Malta, D. C., Soares Filho, A. M., Pinto, I. V., Minayo, M. C. de S., Lima, C. M., Machado, Í. E., ... Naghavi, M. (2020). Association between firearms and mortality in Brazil, 1990 to 2017: A Global Burden of Disease Brazil study. *Population Health Metrics*, 18(Suppl 1), 19.
6. Krüsselmann, K., Aarten, P. G. M., & Liem, M. (2021). Firearms and violence in Europe: A systematic review. *PLOS ONE*, 16(4), e0248955.
7. Kegler, S. R., Stone, D. M., & Holland, K. M. (2022). Vital signs: Changes in firearm homicide and suicide rates — United States, 2019–2020. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 71(19), 656–663.
8. Goldstick, J. E., Cunningham, R. M., & Carter, P. M. (2022). Current causes of death in children and adolescents in the United States. *New England Journal of Medicine*, 386(20), 1955–1956.
9. Patel, J., Leach-Kemon, K., Curry, G., Naghavi, M., & Sridhar, D. (2022). Firearm injury—A preventable public health issue. *The Lancet Public Health*, 7(11), e976–e982.
10. Santaella-Tenorio, J., Cerdá, M., Villaveces, A., & Galea, S. (2016). What do we know about the association between firearm legislation and firearm-related injuries? *Epidemiologic Reviews*, 38(1), 140–157.
11. Shrivastava, P., Jain, V. K., & Nagpal, S. (2021). Gunshot residue detection technologies—a review. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 11, 11.
12. Serol, M., Ahmad, S. M., & Família, C. (2023). Chemical analysis of gunpowder and gunshot residues. *Molecules*, 28(14), 5550.
13. Taudte, R. V., Beavis, A., Blanes, L., Cole, N., Doble, P., & Roux, C. (2014). Detection of gunshot residues using mass spectrometry. *BioMed Research International*, 2014, 965403.
14. Minzière, V. R., Gassner, A.-L., Gallidabino, M., Roux, C., & Weyermann, C. (2023). The relevance of gunshot residues in forensic science. *WIREs Forensic Science*, 5(2), e1472.
15. de Souza Ferreira, I. M., Braz, B. F., da Silva, L., Luna, A. S., & Santelli, R. E. (2021). Gunshot residue and gunshot residue-like material analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry imaging. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 177, 177.
16. Abrego, Z., Grannis, N., Wetzel, S. J., & McCord, B. R. (2012). Unambiguous characterization of gunshot residue particles using scanning laser ablation and inductively coupled plasma–mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 84(5), 2402–2409.
17. Pluháček, T., Balínová, P., Louška, J., & Rychlovský, P. (2018). Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry imaging: A personal identification based on a gunshot residue analysis on latent fingerprints. *Analytica Chimica Acta*, 1032, 30–39.
18. Brünjes, R., Schuurman, J., von der Kammer, F., Hofmann, T., & Schäfer, J. (2022). Rapid analysis of gunshot residues with single-particle inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *Forensic Science International*, 332, 111202.
19. Vander Pyl, C., Bluett, J., Buszka, M., & MacCuspie, R. I. (2021). Analysis of primer gunshot residue particles by laser-induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 146(17), 5442–5454.

20. Miller, T. C., DeWitt, H. L., & Havrilla, G. J. (2005). Characterization of small particles by micro X-ray fluorescence. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 60(10–11), 1458–1467.
21. Langstraat, K., Knijnenberg, A., Edelman, G., van de Merwe, L., van Loon, A., Dik, J., & van Asten, A. C. (2017). Large area imaging of forensic evidence with MA-XRF. *Scientific Reports*, 7, 15056.
22. Berendes, A., Neimke, D., Schumacher, R., & Wennig, R. (2006). A versatile technique for the investigation of gunshot residue patterns on fabrics and other surfaces: m-XRF. *Journal of Forensic Sciences*, 51(5), 1085–1090.
23. Brožek-Mucha, Z., & Klag, I. (2024). Optimizing the automated analysis of inorganic gunshot residue particles by SEM-EDX: From synthetic particle standards to more time-efficient settings for daily casework. *Quantum Beam Science*, 8(4), 28.
24. Szakas, S. E., de Souza Ferreira, I. M., Braz, B. F., & Santelli, R. E. (2023). Elemental characterization of leaded and lead-free primers by inductively coupled plasma optical emission spectrometry and principal component analysis. *Applied Spectroscopy*, 77(2), 152–165.
25. Guo, H., Liu, J., Li, Y., Xu, L., & Yang, J. (2023). Lead isotope measurement of primer gunshot residues and its application in forensic science. *Journal of Forensic Sciences*, 68(2), 638–646.
26. Gunas, V., Bobkov, P., Plakhotniuk, I., Olhovenko, S., & Solonyi, O. (2021). Specifics of fire damage to cotton clothing while shooting point-blank at a human torso simulator from a Fort-12RM pistol. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 23(1), 175-187.
27. Mikhailenko, O. V., Roshchin, H. H., Dyadik, O. O., Irkin, I. V., Malisheva, T. A., Kostenko, Y. Y., ... & Hel, A. P. (2021). Efficiency of determination of elemental composition of metals and their topography in objects of biological origin using spectrometers. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology*, 15(1), 1278-1284.