

## ВІЙСЬКОВА МЕДИЦИНА

<https://doi.org/10.35339/ekm.2020.87.02.07>  
УДК 539.264:616-008.856.6-001.46

*І.Ф. Михайлов<sup>1</sup>, О.А. Батурін<sup>1</sup>, О.Є. Гавриков<sup>3</sup>, В.В. Негодуйко<sup>2</sup>,  
Р.Н. Михайлуков<sup>3</sup>, Т.П. Якімова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Національний технічний університет*

*«Харківський політехнічний інститут», Україна*

<sup>2</sup>*Військово-медичний клінічний Центр Північного регіону МО України, м. Харків*

<sup>3</sup>*Харківська медична академія післядипломної освіти МОЗ України*

## РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ КАПСУЛ СТОРОННІХ ТІЛ М'ЯКИХ ТКАНИН ВОГНЕПАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ У ДИНАМІЦІ

У статті представлені результати рентгеноспектрального аналізу 36 капсул сторонніх тіл м'яких тканин вогнепального походження, видалених з м'яких тканин хірургічним шляхом в різні терміни від 2 місяців до 23 років після вогнепального поранення. Видалені частини тканин навколо стороннього тіла були представлені фіброзною, жировою та м'язовою тканинами з капсулою різного ступеня сформованості. Виявлено достовірні зміни глибинних процесів взаємодії чужорідних тіл вогнепального походження з м'якими тканинами людини на структурному рівні. Зі збільшенням часу перебування стороннього тіла в м'яких тканинах відбувається перехід від нижчого оксиду FeO до проміжного оксиду Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і, нарешті, до вищого оксиду Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Запропоновано термін «біологічної адаптації організму» відносно сторонніх тіл м'яких тканин. Показано особливості зміни структурного складу капсули стороннього тіла, які дозволяють визначити час перебування стороннього тіла в м'яких тканинах.

**Ключові слова:** *рентгеноструктурний аналіз, капсула стороннього тіла, вогнепальне поранення, м'які тканини.*

### Вступ

Наявність активних бойових дій та збільшення кількості вогнепальних поранень протягом останніх років [1] надає актуальності розробці нових, більш досконалих методів діагностики й лікування вогнепальних поранень та удосконаленню хірургічної тактики.

Однією з серйозних проблем при довготривалих військових конфліктах є хірургічна тактика при остаточних сторонніх тілах м'яких тканин вогнепального походження.

Найбільш поширений контингент поранених під час ведення локальних або поширених бойових дій – це легкопоранені, значну частину з яких складають поранені у м'які тканини. В структурі бойової хірургічної травми легкопоранені складають 60–70 %, серед яких по локалізації превалюють пошкодження кінцівок – 80–96 %, поранення м'яких тканин

голови – до 10%, інші поранення – 10 %. Поранення тільки м'яких тканин кінцівок зустрічається у 30–35 % [2].

### Обґрунтування дослідження

Однією з дискусійних проблем сучасної хірургії бойових пошкоджень є хірургічна тактика щодо сторонніх тіл вогнепального генезу. Для розробки обґрунтованої лікувальної тактики потрібно більш поглиблене вивчення взаємодії сторонніх тіл з м'якими тканинами на тканинному, клітинному, субклітинному рівнях. Одним з таких методів є рентгеноструктурний аналіз. Найбільш часто це металеві сторонні тіла зі значним вмістом заліза.

Основні труднощі структурної атестації домішок в біологічних об'єктах пов'язана з надзвичайно низьким їх вмістом, тому для отримання структурних відображень, які можна

виявити в спектрі дифракції, доводиться застосовувати дуже потужні рентгенівські пучки, наприклад синхротронне випромінювання [3–6]. Застосування технології рентгеноструктурного аналізу утворених капсул навколо сторонніх тіл м'яких тканин може доповнити наукові дані щодо взаємодії сторонніх тіл з м'якими тканинами організму та сприяти розробці й обґрунтуванню більш оптимальної хірургічної тактики відносно видалення сторонніх тіл м'яких тканин (СТМТ) вогнепального генезу.

**Метою роботи** є отримання та узагальнення даних щодо ступеня окиснення заліза у капсулах навколо сторонніх тіл м'яких тканин вогнепального походження за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу нанодомішок в біологічних тканинах для модернізації методу рентгенівської дифракції.

#### **Матеріали та методи**

Проаналізовано 36 капсул сторонніх тіл вогнепального походження видалених з м'яких тканин хірургічним шляхом у різні терміни, межі яких були від 2 місяців до 23 років після вогнепального поранення. Усі постраждали, яким було видалено сторонні тіла вогнепального походження проходили лікування у Військово-медичному клінічному центрі Північного регіону Міністерства Оборони України у період з 2014 по 2017 роки та були виписані з одужанням. Вогнепальні поранення були отримані під час проведення військових та миротворчих операцій, у тому числі АТО/ООС. Видалені частинки тканин навколо стороннього тіла були представлені фіброзною, жировою та м'язовою тканинами з капсулою різного ступеня сформованості.

Шматочки м'яких тканин фіксували у 40 % нейтральному формаліні та піддавали парафіновій проводці за методикою прийнятою у роботі патологоанатомічних лабораторій [7]. Після парафінової проводки виготовляли зрізи товщиною 5–6 мкм, які фарбували гематоксиліном і еозином, а також за методом Ван-Гізона. Оцінювали стан м'яких тканин у світловому мікроскопі («Carl Zeiss Ema», Germany) при дозвільному збільшенні мікроскопа в 56 і в 400 разів. У якості досліджуваного матеріалу були капсули сторонніх тіл, видалені з м'яких тканин. Після попередньої мікроскопічної оцінки досліджуваний біологічний матеріал витягувався з парафінових блоків, містився на плівці ULTRALENE товщиною 4 мкм в робочу камеру спектрометра. Зйомки спектрів рентгенівської флуоресценції проводили на енергодисперсійному спектрометрі «Спрут» (Україна)

за оригінальною методикою [8]. Час набору спектра 300 або 600 секунд. Необхідні розміри матеріалу для дослідження від 5×5 до 10×10 мм. У більшості випадків від 5 до 7 мм в найбільшому вимірі. Мікроскопія матеріалу дозволяла упевнитися у дослідженні необхідних тканин. Спочатку досліджували еталони оксиду заліза та здорові м'які тканини у якості контрольної групи, потім – капсули сторонніх тіл.

Вивчення процесів окиснення сторонніх домішок в тканинах людини було проведено методом рентгенівської дифрактометрії (XRF) за допомогою рентгенівського фазового аналізу. Цей метод є загальноновизнаним для структурної атестації зразків і спирається на міжнародну базу даних ASTM (American Society of Testing Materials).

На спектрі рентгенівської дифракції вимірюють положення всіх дифракційних піків і по ним обчислюють відповідні міжплощинні відстані. Отриманий набір значень досліджуваного зразка зіставляють з базою даних і проводять ідентифікацію всіх його фаз [4, 9, 10].

Однак застосування потужних пучків обмежена радіаційною та термічною стійкістю досліджуваного матеріалу і загрожує руйнуванням біологічного об'єкта під пучком.

Для проведення структурного аналізу нами використовувалась оригінальна схема [8] з вторинним випромінювачем зі скандію, калію та хлору.

Відповідно до відомих даних при скануванні зразка неокисненого  $\alpha$ -Fe виявляється посилення тільки ліній K-K $\beta$  та Sc-K $\beta$  вторинних випромінювачів, а всі інші лінії залишаються без зміни.

Зразок нижчого оксиду FeO надає при скануванні посилення ліній Cl-K $\alpha$  та Cl-K $\beta$ , але найбільше посилення спостерігається на лініях K-K $\alpha$  (I=100) і Sc-K $\beta$  (I=63), при цьому лінії K-K $\alpha$  та Sc-K $\beta$  залишалися без змін.

Зразок вищого оксиду Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> надає при скануванні посилення всіх ліній вторинних випромінювачів, хоча найменший ефект повинен спостерігатися на лінії K-K $\alpha$  (I=18).

Таким чином, аналізуючи спектри дифракції різних ліній вторинних випромінювачів можна спостерігати перехід від чистого заліза до нижчого і, нарешті, до вищого оксиду.

Як еталони нами були обрані порошки оксидів FeO та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а також однофазний зразок  $\alpha$ -Fe. Оскільки нижчий оксид FeO є нестабільним і легко окислюється до Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> навіть при кімнатній температурі, ми провели його структурну атестацію за стандартною

методикою рентгенофазового аналізу на рентгенівському дифрактометрі. На рентгенівській дифрактограмі еталона FeO поряд із відбитками від кристалічної решітки FeO спостерігаються досить інтенсивні відображення Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (окис-закис заліза).

Кількісний фазовий аналіз дає співвідношення 60/40 між кількостями цих фаз в ідеалі FeO. Інші зразки  $\alpha$ -Fe та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> виявилися практично однофазними.

Статистична обробка отриманих даних виконувалась за методом Ст'юдента.

### Результати та їх обговорення

Розподіл поранених за термінами знаходження сторонніх тіл (СТ) у м'яких тканинах поранених був наступним: від 2 до 6 місяців – 20; від 6 місяців до року – 7, від 12 до 24 місяців – 6; більше 24 місяців – 3 спостереження.

Фрагменти експериментальних рентген-дифракційних спектрів трьох еталонів  $\alpha$ -Fe, FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які були зняті в випромінюваннях K-K $\alpha$  і Sc-K $\alpha$  представлені на рис. 1–2.

На обох спектрах чітко видно структурні відображення, відповідні кожній з цих фаз. Видно, що у випромінюванні K-K $\alpha$  найбільш сильно проявляється основне структурне відображення (110)  $\alpha$ -Fe  $d=2,02$  Å. Структурні відображення фаз FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> значно слабкіші, а Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – вельми слабкі. З іншого боку, у випромінюванні Sc-K $\alpha$  відображення від фази  $\alpha$ -Fe не виявляються, але присутні піки FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Причому відображення від

фази Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> тільки одне з  $d=1,61$  Å від Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спостерігається два відображення –  $d=1,69$  Å та  $d=1,60$  Å зі співвідношеннями інтенсивностей 100/15.

Таким чином, основні фази  $\alpha$ -Fe, FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дають абсолютно різні дифракційні картини в розглянутих діапазонах спектрів, тому їх дифрактограми можуть застосовуватися для оцінки співвідношення цих фаз у зрізах біологічних тканин.

Аналізуючи отримані дифрактограми можна зробити висновок про те, що СТ при попаданні в біологічну тканину викликає зміни її структури з утворенням нових фаз (хімічних сполук). Кожна нова фаза характеризується набором міжплощинних відстаней  $d_{hkl}$ .

У досліджуваних поранених металеве СТ перебувало різний проміжок часу в м'яких тканинах і отже, піддавалося різній тривалості впливу середовища організму. Як видно зі спектра, знятого в K-K $\alpha$  (рис. 3), в зразку з найбільшою витримкою СТ (23 роки) відображення (110)  $\alpha$ -Fe  $d=2,02$  Å не виявлено.

Однак при знаходженні металевого СТ 2 роки та 10 місяців слабке віддзеркалення  $\alpha$ -Fe спостерігається. Це означає, що навіть при мінімальному часі знаходження залізного СТ в організмі людини воно значною мірою перетворюється під впливом середовища організму, а при більш тривалому знаходженні упродовж 23 років, зникає повністю.

Найбільш повну інформацію про окислення заліза в організмі можна отримати з экс-

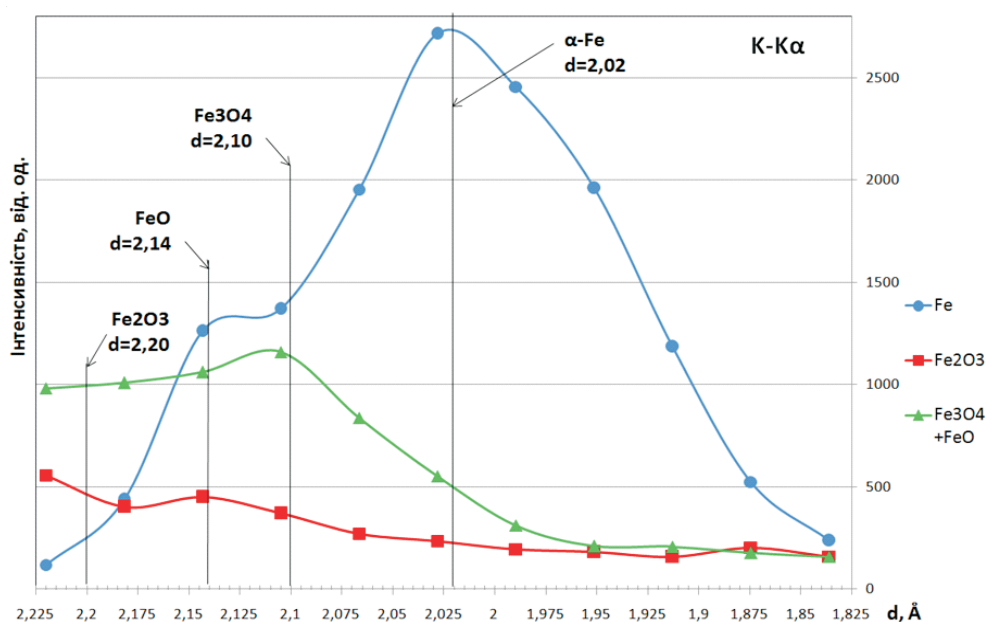


Рис. 1 Фрагмент рентген-дифракційного спектра еталонних сумішей в випромінюванні K-K $\alpha$ . Штрихами вказані положення дифракційних піків за даними ASTM

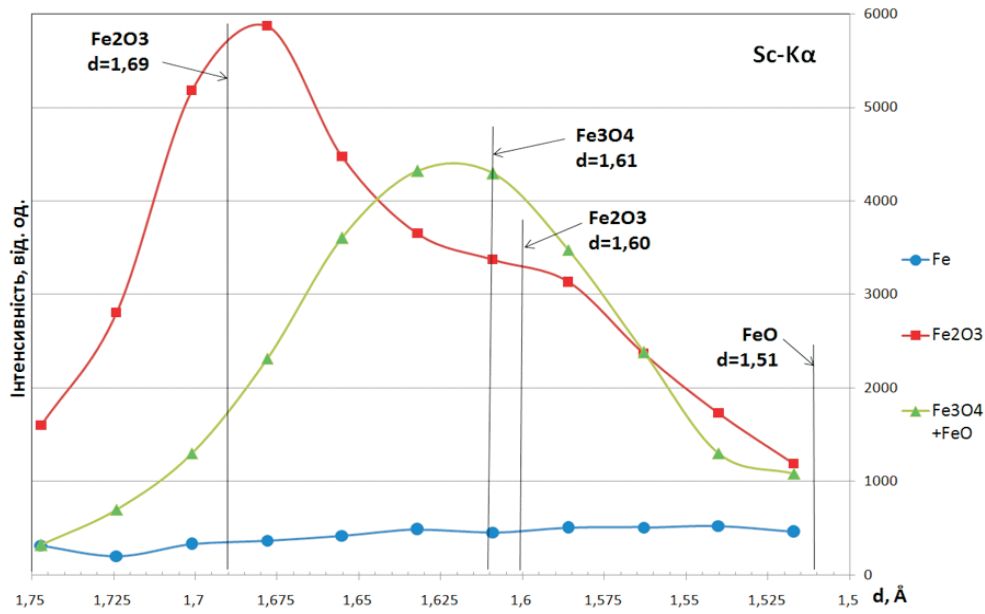


Рис. 2. Фрагмент рентген-дифракційного спектра еталонних сумішей в випромінюванні Sc-K $\alpha$ .

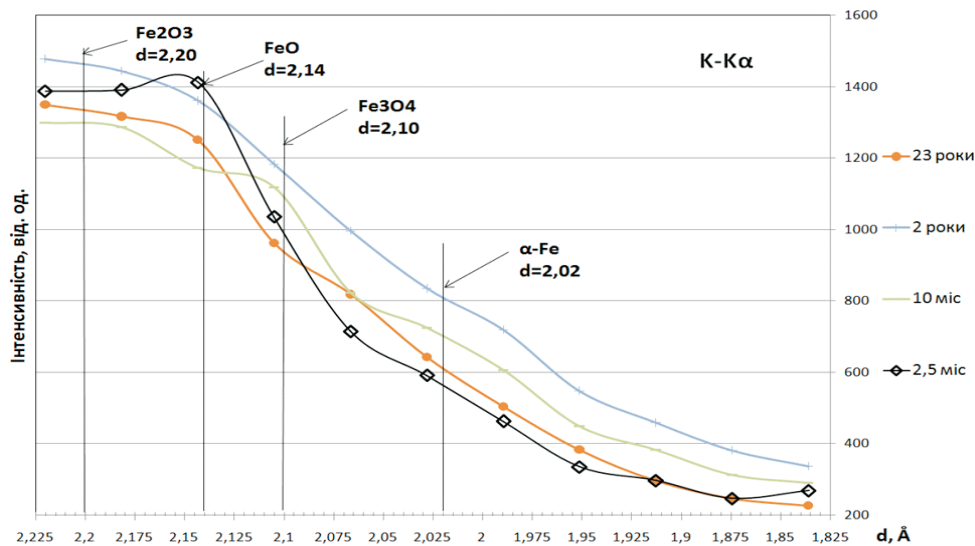


Рис. 3. Фрагмент дифрактограми тканин з різним часом знаходження СТ в організмі людини. Випромінювання K-K $\alpha$ .

периментальних дифрактограм знятих у випромінюванні Sc-K $\alpha$  (рис. 4).

В спектрах зразків капсули м'яких тканин з найбільшими термінами перебування металевих СТ в м'яких тканинах людини (від 18 до 23 років) в основному виявляються структурні відображення вищого оксиду заліза Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а відображення нижчого оксиду Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> практично відсутні. При меншій тривалості (від 3 міс до 2 років) знаходження СТ в м'яких тканинах в спектрі виявляються структурні відображення нижчого оксиду FeO, а також Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Виявлене окислення сторонніх тіл на основі аналізу металевих осколків, які містять  $\alpha$ -Fe в м'яких тканинах пораненого до утворення нижчого оксиду FeO відбувається протягом (2,4 $\pm$ 1,3) місяця, тому залишкове неокислене залізо по структурним відображенням практично не виявляється. Зі збільшенням часу перебування СТ в м'яких тканинах від (2,4 $\pm$ 2,3) до (12,6 $\pm$ 6,3) місяця відбувається перехід до проміжного оксиду Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і, нарешті, через (25,4 $\pm$ 1,6) місяця – до вищого оксиду Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Наявність СТМТ вогнепального походження при різних рівнях вивчення має свої від-

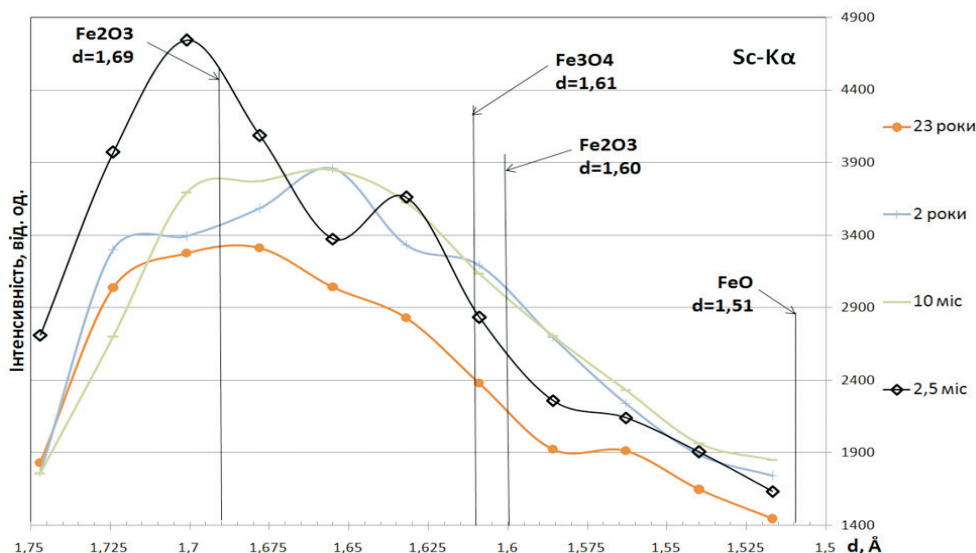


Рис. 4. Фрагмент дифрактограми тканин з різним часом знаходження СТ в організмі людини. Випромінювання Sc-K $\alpha$

мінності, які ми виділили та систематизували у три фази носійства СТМТ: активних динамічних змін; перехідна; нестабільної рівноваги.

Фаза активних динамічних змін починається з кінця 1-го тижня після поранення при наявності СТМТ та триває до 10–12 місяців, коли відмічаються активні зміни на елементному, структурному, клітинному та тканинному рівнях у капсулі СТ, які клінічно можуть мати прояви у вигляді ускладнень (міграції, нагноєння, нориць) та наявності болювого синдрому або без клінічних проявів. Термін 10–12 місяців має назву «пік максимальних змін». Видалення СТМТ з капсулою під час ускладнення приводить до одужання.

Перехідна фаза триває від 1 року до 2 років. Зміни в капсулі навколо СТМТ регресують, що має відображення на елементному, структурному, клітинному та тканинному рівнях, зменшується кількість ускладнень. Термін 2 роки виступає у ролі «біологічної адаптації організму».

### Література

1. Вказівки з воєнно-польової хірургії / за ред. Я. Л. Заруцького, А. А. Шудрака. – Київ : СПД Чалчинська Н. В., 2014. – 396 с.
2. Военно-полевая хирургия [учебник / под ред. Е. К. Гуманенко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 768 с.
3. Рентгеновские методы анализа состава материалов: монография / И. Ф. Михайлов, А. А. Батурин, А. И. Михайлов. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХП»», 2015. – 204 с.
4. Рентгенофлуоресцентный анализ / [ Кляйнштюк К. Х., Венер Б., Рихтер К. и др. ] ; под ред. Х. Эрхардта ; пер. с нем. В. А. Федоровича. – М.: Металлургия, 1985. – 255 с.
5. Abdelrazig M. Abdelbagi. Sharf Eldeen Concentrations of trace elements in human hair as a biomarker expose to environmental contamination / Abdelrazig M. Abdelbagi, Maraim A. Gilani Mustafa,

Фаза нестабільної рівноваги триває від 2 років та більше і характеризується мінімальними змінами на елементному, структурному, клітинному, тканинному рівнях у капсулі СТ та клінічними проявами носійства СТ, що пов'язано з процесами взаємодії структурних елементів СТ з оточуючими тканинами в капсулі, яка ізолює СТ від незмінених тканин.

### Висновки

1. Метод рентгеноструктурного аналізу є перспективним та правдивим для вивчення глибинних процесів взаємодії сторонніх тіл вогнепального походження з м'якими тканинами людини на структурному рівні.
2. Зі збільшенням часу перебування стороннього тіла в м'яких тканинах відбувається перехід від нижчого оксиду FeO до проміжного оксиду Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і, нарешті, до вищого оксиду Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
3. Дані рентгеноструктурного аналізу в сукупності з морфологічними дослідженнями важливі для визначення терміну перебування стороннього тіла у м'яких тканинах, що можливо застосовувати у судово-медичній експертизі.

ALi E. // International Journal of Scientific Research and Innovative Technology. – 2017. – Vol. 4, № 2. – P. 38–43.

6. Application of X-ray fluorescence analysis to determine the elemental composition of tissues from different ovarian neoplasms / I. G. Motevich, N. D. Strekal, N. M. Papko [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2015. – Vol. 82, № 1. – P. 98–103.

7. Гістологія з основами гістологічної техніки [підручник / за ред. В. П. Пішака]. – Київ: КОНДОР, 2008. – 400 с.

8. Пат. №98040 Україна, ПМК G01N 23/20 (2006.01). Спосіб визначення вмісту вуглецю в сталі / Михайлов І. Ф., Батурін О. А., Михайлов А. І.; заявник і патентовласник Національний технічний університет. – № u201412863 ; заявл. 01.12.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

9. Fahrni C. J. Biological applications of X-ray fluorescence microscopy: exploring the subcellular topography and speciation of transition metals / C. J. Fahrni // Curr Opin Chem Biol. – 2007. – №.11 (2). – P. 121–127.

10. Analysis of copper concentration in human serum by application of total reflection X-ray fluorescence method / A. Kubala-Kukus, D. Banas, J. Braziewicz [et al.] // Biol Trace Elem Res. – 2014. – Vol. 158 (1). – P. 22–28. – DOI: 10.1007/s12011-013-9884-4. – PMID: PMC3955133.

### References

1. Zarutskij Ya. L., Shudrak A.A. (Eds.). (2014). *Ukazaniya po voyenno-polevoy khirurgii [Guide to Military Field Surgery]*. Kiev.: SPD Chalchins'ka N.V., 396 p. [in Ukrainian].

2. Humanenko Ye.K. (Eds.). (2016). *Voiennno-polevaia khirurgiia: uchebnik [Military-field surgery: a textbook]*. (2d ed.). Moscow: HEOTAR-Media, 768 p. [in Russian].

3. Mikhaylov I.F., Baturin A.A., Mikhaylov A.I. (2015). *Rentgenovskiy metody analiza sostava materialov [X-ray methods of analysis of the composition of materials]*. Kharkiv: Izd-vo «Uchebnik NTU"KHPI"», 204 p. [in Russian].

4. Klyaynshtyuk K.Kh., Vener B., Rikhter K. et al. (1985). *Rentgenofluorestsentnyy analiz [X-ray fluorescence analysis]*. Erkhhardt X. (Ed.). (V.A. Fedorovich, Trans). Moscow: Metallurgiya, 255 p. [in Russian].

5. Abdelrazig M. Abdelbagi, Maraim.A. Gilani Mustafa, ALi E. Sharf Eldeen (2017). Concentrations of trace elements in human hair as a biomarker expose to environmental contamination. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, vol. 4, № 2, pp. 38–43.

6. Motevich I.G., Strekal N.D., Papko N.M., Glebovich M.I., Shulha A.V., Maskevicha S.A. (2015). Application of x-ray fluorescence analysis to determine the elemental composition of tissues from different ovarian neoplasms. *Journal of Applied Spectroscopy*, vol. 82, № 1, pp. 98–103.

7. Peshak V.P. (Eds.). (2008). *Gistologiya s osnovami gistologicheskoy tekhniki [Histology with the basics of histological technique]*. Kiev: KONDOR, 400 p. [in Ukrainian].

8. Mikhaylov I.F., Baturin A.A., Mikhaylov A.I. (2015). *Sposib vyznachennya vmistu vuhletsyu v stali. Deklaratsiini patent na vinakhid № 98040, Ukraina, MPK G01N 23/20 (2006.01) [Method for determination of carbon content in steel Natsionalnyy tekhnicheskyy universitet. Declarative patent for invention № 98040, Ukraine, IPC G01N 23/20 (2006.01)]*. № u201412863, declared 01.12.2014, published 10.04.2015, bulletin № 7 [in Ukrainian].

9. Fahrni C.J. (2007). Biological applications of X-ray fluorescence microscopy: exploring the subcellular topography and speciation of transition metals. *Curr Opin Chem Biol.*, vol. 11 (2), pp. 121–127.

10. Kubala-Kukus A., Banas D., Braziewicz J., Majewska U., Pajek M., Wudarczyk-Mocko J. et al. (2014). Analysis of Copper Concentration in Human Serum by Application of Total Reflection X-ray Fluorescence Method. *Biol Trace Elem Res.*, vol. 158 (1), pp. 22–28, DOI: 10.1007 / s12011-013-9884-4, PMID: PMC3955133.

### **И.Ф. Михайлов, А.А. Батурин, А.Е. Гавриков, В.В. Негодуйко, Р.Н. Михайлулов, Т.П. Якимова** **РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ КАПСУЛ ИНОРОДНЫХ ТЕЛ МЯГКИХ ТКАНЕЙ** **ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ДИНАМИКЕ**

В статье представлены результаты рентгеноспектрального анализа 36 капсул инородных тел мягких тканей огнестрельного происхождения, удалённых из мягких тканей хирургическим путём в разные сроки от 2 месяцев до 23 лет после огнестрельного ранения. Удалённые части тканей вокруг инородного тела были представлены фиброзной, жировой и мышечной тканями с капсулой разной степени сформированности. Выявлены достоверные изменения глубинных процессов взаимодей-

ствия инородных тел огнестрельного происхождения с мягкими тканями человека на структурном уровне. С увеличением времени пребывания инородного тела в мягких тканях происходит переход от низшего оксида FeO к промежуточному оксиду Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и, наконец, к высшему оксиду Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Предложен термин «биологической адаптации организма» применительно к инородным телам мягких тканей. Показаны особенности изменения структурного состава капсулы инородного тела, которые позволяют определить время пребывания инородного тела в мягких тканях.

**Ключевые слова:** рентгеноструктурный анализ, капсула инородного тела, огнестрельное ранение, мягкие ткани.

*I.F. Mikhailov, A.A. Baturin, A.E. Gavrikov, V.V. Negoduyko, R.N. Mikhailusov, T.P. Yakimova*

#### X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS OF CAPSULES OF FOREIGN BODIES OF SOFT TISSUES OF FIRE ORIGIN IN DYNAMICS

One of the debatable problems of modern combat injury surgery is surgical tactics against foreign bodies of firearms genesis. Most often it is metal foreign bodies with a significant content of iron. To develop a sound treatment tactic, a more in-depth study of the interaction of foreign bodies with soft tissues at the tissue, cellular, subcellular level is needed. One such method may be X-ray diffraction analysis. The aim of the work is to modernize the X-ray diffraction method to enable structural analysis of nano impurities in biological tissues, to obtain and generalize data on the degree of iron oxidation in capsules around foreign bodies of soft tissues of fire origin. The article presents the results of X-ray spectral analysis of 36 capsules of foreign bodies of soft tissues of firearms origin, removed from soft tissues by surgery within 2 months to 23 years after the gunshot wound. The removed parts of the tissues around the foreign body were represented by fibrous, adipose and muscle tissues with a capsule of varying degrees of formation. The detected oxidation of foreign bodies based on the analysis of metal fragments that contain  $\alpha$ -Fe in the soft tissues of the wounded leads to the formation of lower FeO oxide, which occurs within  $2.4 \pm 1.3$  months, so that residual unoxidized iron on structural maps is almost undetectable. With an increase in the residence time of a foreign body in soft tissues from  $2.4 \pm 2.3$  months to  $12.6 \pm 6.3$ , there is a transition to the intermediate Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oxide and, finally, after  $25.4 \pm 1.6$  months to the higher Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide. Removal of foreign bodies of soft tissues with a capsule during complication leads to recovery. The term «biological adaptation of the organism» is proposed in relation to foreign bodies of soft tissues. Features of change of structural structure of a capsule of a foreign body which allow to define time of stay of a foreign body in soft tissues are shown.

**Keywords:** X-ray diffraction analysis, foreign body capsule, gunshot wound, soft tissues.

*Надійшла до редакції 26.08.2020*

#### Відомості про авторів

*Михайлов Ігор Федорович* – доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник кафедри фізики металів і напівпровідників Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Адреса: Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Тел.: +38(057)707-66-34.

E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-5352>.

*Батурин Олексій Анатолійович* – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри фізики металів і напівпровідників Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Адреса: Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Тел.: +38(057)707-66-34.

E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7541-8303>.

*Гавриков Олександр Євгенович* – кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри медицини невідкладних станів та медицини катастроф Харківської медичної академії післядипломної освіти МОЗ України.

Адреса: Україна, 61171, м. Харків, Салтівське шосе, 266-В.

Тел.: +38(057)711-79-45.

E-mail: xoktb@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2026-9483>.

*Негодуйко Володимир Володимирович* – доктор медичних наук, полковник медичної служби, начальник клініки невідкладної медичної допомоги (та прийому і евакуації) Військово-медичного клінічного центру Північного регіону Міністерства Оборони України.

Адреса: Україна, 61058, м. Харків, вул. Культури, 5.

Тел.: +38(057)702-17-97.

E-mail: vol-ramzes13@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4540-5207>.

*Михайлусов Ростислав Миколайович* – доктор медичних наук, професор, професор кафедри ендоскопії та хірургії Харківської медичної академії післядипломної освіти МОЗ України.

Адреса: Україна, 61176, м. Харків, вул. Амосова, 58.

Тел.: +38(057)711-35-56.

E-mail: mihailusov1@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5869-7013>.

*Якимова Тамара Петрівна* – доктор медичних наук, професор, професор кафедри клінічної лабораторної діагностики Харківської медичної академії післядипломної освіти МОЗ України.

Адреса: Україна, 61176, м. Харків, вул. Амосова, 58.

Тел. +38(057)711-35-56.

E-mail: mihailusov1@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6220-117X>.