

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Ополонін Олександр Дмитрович



УДК 620.179.152.1:539.26

ПРИНЦИПИ ХАРАКТЕРИЗАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЕФЕКТИВНИМ АТОМНИМ  
НОМЕРОМ ПРИ РАДІОГРАФІЧНОМУ КОНТРОЛІ

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

## Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Рижиков Володимир Діомидович**,  
Інститут сцинтиляційних матеріалів  
НАН України,  
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
**Дудник Олексій Володимирович**,  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор  
**Кудін Олександр Михайлович**,  
Національний університет цивільного захисту  
ДСНС України,  
доцент кафедри фізико-математичних дисциплін

Захист відбудеться « 9 » вересня 2021 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Науки, 14.

Автореферат розісланий « 4 » серпня 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.М. Одаренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Поступова заміна плівкової радіографії на цифрову призвела до винайдення не тільки нових методів отримання тіньових рентгенівських зображень, але й до винайдення нового методу характеристики матеріалів за ефективним атомним номером.

Першою галуззю, де метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером знайшов широке застосування, були доглядові цифрові радіографічні системи (ЦРС) для митного контролю. Можливість характеризувати вміст багажу за ефективним атомним номером суттєво підвищила інформативність митного догляду, а саме, виділити кольором три групи матеріалів: матеріалам із  $Z_{\text{eff}} < 10$  відповідають відтінки помаранчевого кольору; матеріалам із  $10 < Z_{\text{eff}} < 20$  відповідають відтінки зеленого кольору; матеріалам із  $Z_{\text{eff}} > 20$  відповідають відтінки синього кольору.

На сьогодні потреба у таких ЦРС існує не тільки у пунктах митного контролю та аеропортах, але й у банках, на стадіонах, містах скупчення великої кількості людей, тощо. Таким чином, ЦРС є невід'ємною частиною сучасних систем безпеки та протидії тероризму. Актуальним є підвищення роздільної здатності ЦРС за ефективним атомним номером, особливо для "легких" матеріалів, до яких можна віднести вибухівку, наркотичні речовини, тощо.

Другою галуззю застосування ЦРС є медицина. У медицині спроможність ЦРС характеризувати матеріали за ефективним атомним номером використовується, наприклад, для діагностики остеопорозу, ожиріння, оцінки стану судин, тощо.

ЦРС також широко використовуються у неруйнівному контролі (НК) та технічній діагностиці (ТД). Можливість характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  може бути використана для діагностики пропорцій у сумішах матеріалів, які мають відмінності за  $Z_{\text{eff}}$ .

Кожна галузь застосування має свої особливості й потребує оптимізації характеристик підсистем ЦРС (випромінювач, детектори випромінювання, тощо). В ЦРС для характеристики матеріалів за ефективним номером використовують реєстрацію рентгенівського випромінювання, що пройшло крізь об'єкт контролю у двох або декількох енергетичних діапазонах. Тому, значною мірою, оптимізація спеціалізованих ЦРС полягає у дослідженні енергоселективних характеристик детекторів і врахуванні апріорі відомих характеристик об'єкту контролю (ОК). Наприклад, для медицини та НК товщина та хімічний склад ОК заздалегідь відомі.

У світі існує багато виробників ЦРС для митного контролю та медицини, але технічні, технологічні та методичні засади створення ЦРС є комерційною таємницею і не розголошуються виробниками. Українська промисловість також має потужності виробництва ЦРС.

Спільно з ДНВП НТ СКБ "Полісвіт", м.Харків, нами було розроблено серію ЦРС для митного контролю, у тому числі такі, що використовують характеристику матеріалів за ефективним атомним номером. Також, у м. Харкові є виробники рентгенівських апаратів та ЦРС для медицини

(наприклад, фірми "Квант" та "Радмір"), тому вдосконалення існуючих методів та розробку нових методів характеристики матеріалів за ефективним атомним номером, можна вважати актуальною задачею, вирішення якої може сприяти створенню ЦРС з новими функціональними можливостями та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних ЦРС на світовому ринку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності планів робіт НТК Інститут монокристалів та Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (ІСМА НАН України). Її результати пов'язані з дослідженнями, що проводилися автором відповідно до: 1) пошукових тем Інституту сцинтиляційних матеріалів: "Дослідження можливості розділення речовин за ефективним атомним номером" Шифр "Палітра" (№ держреєстрації 0113U001837, відповідальний виконавець) та "Дослідження особливостей практичного використання мультиенергетичного підходу для цифрової радіографії" Шифр "Палітра 2" (№ держреєстрації 0114U001509, відповідальний виконавець); 2) комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" виконувались науково-дослідні роботи: "Проведення натурних випробувань приймально – детектуючого тракту цифрової радіографічної системи з отриманням тінювих рентгенівських зображень" шифр "Ресурс", 2010-2012 рр. (№ держреєстрації 0110U005184, відповідальний виконавець); "Розробка та виготовлення приймально – детектуючого тракту цифрової радіографічної системи з підвищеним просторовим розділенням для контролю зварних з'єднань, трубопроводів та металоконструкцій" Шифр теми А/4-Р 2.7-07, 2007-2009 р.р. (№ держреєстрації 0107U008565, відповідальний виконавець); "Розробка та дослідження системи цифрового радіографічного контролю зварних з'єднань та металоконструкцій" Шифр "сонце" 2004-2006 рр. (№ держреєстрації 0104U006379, виконавець, відповідальний виконавець); 3) підтримки грантів МОН виконувалась НДР «Нова генерація мультиенергетичних рентгенівських сканерів для антитерористичного контролю SfP 982823» (№ держреєстрації 0109U005411, відповідальний виконавець); 4) теми за Державною науково-технічною програмою розвитку мікро- та оптоелектронних технологій в Україні "Оптоелектронні пристрої для сфери охорони здоров'я, моніторингу навколишнього середовища і запобігання тероризму", 2005-2007рр. (№ держреєстрації 0105U001131, виконавець); 5) "Створення оксидних та халькогенідних композитних сцинтиляторів для високочутливих двоенергетичних детекторів багатозрізової комп'ютерної томографії", шифр «Томограф-2» 2013-2015 рр. (№ держреєстрації 0113U001832, виконавець); 6) замовлення Державної митної служби виконувалась дослідно – конструкторська робота "Розроблення та виготовлення учбового комплексу для ознайомлення та придбання навиків роботи з системами митного огляду серії „Поліскан-4”", Шифр "Рось - 1/2002", (№ держреєстрації 0103U000797, керівник роботи).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи - розвиток фізичних методів характеристики матеріалів за ефективним атомним номером при радіографічному контролі.

Досягнення поставленої мети передбачало вирішення таких *завдань*:

- дослідити можливості отримання рентгенівського випромінювання у різних енергетичних піддіапазонах (при різних анодних напругах та умовах фільтрації) для енергетичного діапазону 20-150кеВ;
- виконати моделювання сигналів двоенергетичного сцинтиляційного детектора та дослідити його енергоселективні властивості;
- проаналізувати фізичні механізми взаємодії рентгенівського випромінювання з різними матеріалами та визначити можливості дво- та мульти- енергетичного підходу щодо характеристики матеріалів за ефективним атомним номером;
- розглянути існуючі методи характеристики матеріалів за ефективним атомним номером та провести пошук шляхів створення нових фізичних методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ ;
- створити макетні зразки ЦРС та виконати експериментальну перевірку результатів моделювання та порівняння різних методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ .

*Об'єкт дослідження* – двоенергетична рентгенівська абсорбціометрія.

*Предмет дослідження* – цифрові рентгенографічні системи, спектральний склад рентгенівського випромінювання до та після взаємодії з матеріалами, енергоселективні властивості та сигнали сцинтиляційних детекторів рентгенівського випромінювання.

*Методи дослідження.* Сцинтиляційний метод детектування рентгенівського випромінювання; спектрометричний метод реєстрації рентгенівського випромінювання; методи обчислення взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною; моделювання двоенергетичної цифрової радіографічної системи з подальшою експериментальною апробацією; методи обробки графічних зображень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що в дисертаційній роботі вперше досліджено фізичні аспекти характеристики матеріалів за ефективним атомним номером та запропоновано новий фізичний метод характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ . Зокрема:

**уперше:**

- розроблено фізичний метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером, що дозволяє обчислити параметр, пропорційний масовому коефіцієнту ослаблення, який не залежить від товщини та щільності матеріалу;
- сформульовано критерій однозначної характеристики матеріалів за ефективним атомним номером при радіографічних дослідженнях у діапазоні енергій 20÷150кеВ;

**набули подальшого розвитку:**

- моделювання енергоселективних властивостей двоенергетичного сцинтиляційного детектора типу сцинтилятор – фотодіод та ЦРС у цілому.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що запропонований в роботі метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером дозволяє покращити існуючі ЦРС для митного контролю, протидії тероризму, медицини, НК, тощо.

Як експериментально показано у ході виконання роботи, двоенергетичні ЦРС здатні розрізняти "легкі" матеріали з ефективним атомним номером  $Z$  від 7,06 до 8,07 з точністю 7-9%, тоді як у традиційних ЦРС для митного контролю усі матеріали із  $Z < 10$  віднесені до категорії "легких" матеріалів та не розділяються. У кістковій тканині біологічних об'єктів виявлено зміни мінералізації (за кальцієм) менш ніж на 1-2%, в той час як існуючі ЦРС для діагностування остеопорозу виявляють зміну мінералізації 2-3%.

Крім того, моделювання співвідношення сигналів двоенергетичного детектора було використано при створенні дистанційного приладу для контролю та вимірювання електричних та радіаційних параметрів рентгенівських апаратів. Такий прилад створено у ІСМА НАН України і він з успіхом пройшов випробування у відділенні променевої діагностики харківського ОКЦУН ім. Шаповала та експлуатується дотепер у ІСМА НАН України.

Таким чином, запропонований в роботі фізичний метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером та модельні обчислення співвідношення сигналів двоенергетичного детектора можуть бути використані при створенні нових приладів радіаційного контролю, ЦРС та томографів (для медицини, митного контролю, тощо).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи, що визначають новизну запропонованих методів та фактичні матеріали експериментальних досліджень, були отримані здобувачем особисто.

Проаналізовано фізичні принципи характеристики матеріалів за ефективним атомним номером у дво- та мульти- енергетичних ЦРС [1, 2, 6]. Запропоновано модель двоенергетичного детектора та обчислено співвідношення його сигналів (за різних умов), які було використано для аналізу радіографічних зображень різних об'єктів контролю [2, 3, 5, 13, 16, 20, 22, 27, 29, 30]. Проведено модельні обчислення та експериментальні дослідження енергоселективних властивостей сцинтиляційних детекторів рентгенівського випромінювання [4, 9, 14, 15, 17]. Проведено моделювання кутової залежності сигналів детекторів та отримано радіографічні зображення з підвищеним просторовим розділенням [7, 10, 11, 19, 21, 23, 24].

Розроблено новий фізичний метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером [1, 6, 16, 33].

Створено макетні зразки ЦРС у частині реалізації фізичних засад мульти-енергетичної характеристики матеріалів [1, 18, 19, 21, 23, 24, 33] і вибору сцинтиляційних матеріалів для детекторів [25, 26, 31, 32]. З використанням макетних зразків ЦРС отримано рентгенівські зображення тестових об'єктів,

проведено порівняння результатів моделювання та експерименту [1-3, 6, 8, 11, 12, 16, 18, 20, 25, 27-30, 32, 33].

Формулювання мети та визначення задач роботи, аналіз отриманих результатів проводились разом із науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи оприлюднено та обговорено на наступних конференціях:

Міжнародна конференція "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии", ISMART-2018, Мінськ, Білорусь; міжнародна конференція "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии", ISMART-2014, Мінськ, Білорусь; "IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 23-29 October 2011 - Valencia, Spain; 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Червень 2010, Москва, Росія; Міжнародна конференція "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии", ISMART-2010, Харків, Україна; 9-th International conference on applications of nuclear techniques, June, 2008, Crete, Greece; 9th European Conference for Non-Destructive Testing, September, 2006, Berlin, Germany; NSS-MIC Conference October 16-22, 2004, ROME, Italy; "International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering" (NDT-CE), September 16-19, 2003, Berlin, Germany.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертації опубліковано у 33 наукових працях; з них: 10 у міжнародних та вітчизняних фахових виданнях, 23 статті включено до міжнародної наукометричної бази Scopus. Отримано 1 патент на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел літератури та додатків. Повний обсяг дисертації складає 158 аркушів, дисертація включає 1 додаток, 83 рисунки, 2 таблиці, кількість найменувань у списку використаних джерел 121.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі роботи, визначено предмет, об'єкт та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також, наведено дані про апробацію роботи та відомості про особистий внесок здобувача.

**Перший** розділ присвячений огляду літературних даних. Проведено огляд існуючих ЦРС для трьох основних галузей їх застосування: медицина, системи безпеки, неруйнівний контроль та технічна діагностика. Розглянуто їх основні структурні елементи та фізичні принципи роботи. Проаналізовано тенденції розвитку ЦРС з урахуванням нових функціональних можливостей, порівняно з плівковою радіографією.

Наведено характеристики структурних елементів існуючих ЦРС взагалі, та таких, що використовуються для двоенергетичної абсорбціометрії.

У **другому** розділі розглянуто особливості розробки та створення ЦРС для характеристики матеріалів (сумішей, речовин) за ефективним атомним

номером. Проаналізовано фізичні аспекти взаємодії рентгенівського випромінювання з елементами таблиці Д.І. Менделєєва та матеріалами. Базовим законом ослаблення рентгенівського випромінювання речовиною є:

$$I(E) = I_0(E) \cdot e^{-\mu(E) \cdot l} = I_0(E) \cdot e^{-\mu_m(E) \cdot \rho \cdot l} \quad (1)$$

де  $I_0(E)$  – початкова інтенсивність рентгенівського випромінювання,  $\mu(E)$  – лінійний коефіцієнт ослаблення,  $\mu_m(E)$  – масовий коефіцієнт ослаблення,  $\rho$  – щільність,  $l$  – товщина шару речовини. Лінійний коефіцієнт ослаблення містить інформацію про механізми взаємодії випромінювання з речовиною, щільність та товщину шару речовини, тому для зручності характеристики речовин частіше використовують масовий коефіцієнт ослаблення  $\mu_m(E) = \mu(E) / \rho$ , який не залежить від щільності та товщини шару речовини. Проаналізувавши енергетичну залежність  $\mu_m(E)$  для всіх елементів таблиці Д.І. Менделєєва, виявлено, що тільки два елементи мають значні відмінності цієї залежності у діапазоні енергій 20 ÷ 150 кеВ, а саме: водень та гелій. Інші елементи можна умовно розділити на 2 групи: перша це елементи, що мають К – стрибок поглинання до 20кеВ, друга – елементи, що мають К – стрибок поглинання вище 20кеВ.

Наведено опис детекторів типу сцинтилятор-фотодіод (СЦ-ФД), які було використано для створення макетів ЦРС. Також, наводяться результати досліджень детекторів типу сцинтилятор – фото приймальний пристрій (СЦ-ФПП).

Враховуючи, що при розробці ЦРС для різних галузей застосування існує необхідність оптимізації характеристик підсистем ЦРС, наведено загальну методику та послідовність розробки ЦРС.

Визначено перелік матеріалів та біологічних об'єктів з різним  $Z_{\text{eff}}$  для експериментальної перевірки можливості розділення близьких за  $Z_{\text{eff}}$  об'єктів у трьох діапазонах значень  $Z_{\text{eff}}$ : 1)  $Z_{\text{eff}} < 10$ ; 2)  $10 < Z_{\text{eff}} < 20$ ;  $Z_{\text{eff}} \geq 20$ .

При обранні тестових ОК, враховано особливості трьох основних галузей застосування ЦРС (системи безпеки, медицина, НК). Ефективний атомний номер для обраного діапазону енергій 20÷150кеВ, де переважними механізмами взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною є фотоефект та комптонівське розсіювання, обчислювався за формулою:

$$Z_{\text{eff}} = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k^4}{\sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k} \right]^{1/3} \quad (2)$$

де  $A_k$  та  $Z_k$  – атомна маса та атомний номер простих елементів,  $N$  – загальна кількість простих елементів,  $a_k$  – відносна атомна (молярна) концентрація ( $\sum_{k=1}^N a_k = 1$ ).

У третьому розділі наведено опис спрощеної моделі двоенергетичної ЦРС (рис.1а), що дозволяє обчислити співвідношення інтенсивності світлових потоків, які виникають у сцинтиляційних матеріалах двоенергетичного детектора, після проходження рентгенівського випромінювання крізь ОК з різним  $Z_{\text{eff}}$ .

За обраною моделлю проведено обчислення співвідношення сигналів двоенергетичної лінійки детекторів (ЛД) для матеріалів, що мають різні значення  $Z_{\text{eff}}$  (рис.1б): цукор ( $Z_{\text{eff}}=6,93$ ), вода ( $Z_{\text{eff}}=7,43$ ), алюміній ( $Z=13$ ), сіль ( $Z_{\text{eff}}=15,19$ ), залізо ( $Z=26$ ), мідь ( $Z=29$ ). Обчислення виконано з урахуванням спектру рентгенівської трубки з вольфрамовим анодом, фільтром 2мм алюмінію, при анодній напрузі 150кВ для низькоенергетичного детектора (НД) на базі скінтілятора ZnSe, товщиною  $l_1=0,5\text{мм}$  та високо енергетичного детектора (ВД) на базі скінтілятора CsI, товщиною  $l_2=4\text{мм}$ .

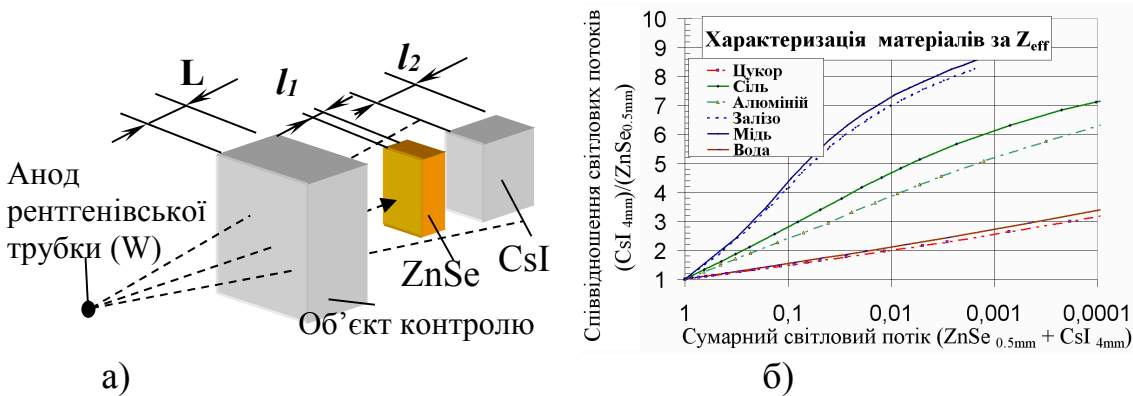


Рис.1. Модель двоенергетичної ЦРС (а), та співвідношення обчислених сигналів (б).

Показано, що роздільно детектуючи високо та низько енергетичну складові рентгенівського випромінювання (РВ), що пройшло крізь матеріали з різним ефективний атомним номером, за співвідношенням сигналів ВД і НД можна розділити матеріали за  $Z_{\text{eff}}$ . Також, використовуючи запропоновану модель, обчислено сигнали двоенергетичного детектора для визначення анодній напруги рентгенівського випромінювача. Такий детектор було використано при створенні пристрою для контролю параметрів рентгенівських випромінювачів.

Для підвищення енергетичної селективності ЦРС у цілому, крім енергетичної селективності детекторів, досліджено можливості роздільного отримання тінювих рентгенівських зображень у різних енергетичних діапазонах за рахунок зміння характеристик рентгенівського випромінювача:

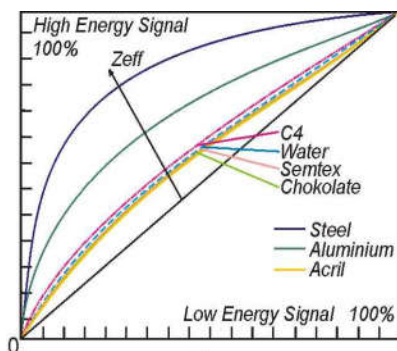


Рис 2. Прямий метод характеристикації вмісту багажу за  $Z_{\text{eff}}$  (фірма Smith Heimann).

отримання зображень при різних анодних напругах, застосування різних фільтрів та рентгенівських дзеркал, тощо.

Розглянуто різні методи характеристикації матеріалів за ефективним атомним номером.

Перший метод – пряма характеристикація матеріалу ОК за сигналами двох детекторів ВД та НД. Позначимо сигнали ВД та НД як Н та L відповідно. На рис. 2 наведено залежність сигналів (L,Н) згідно даних провідного виробника ЦРС для митного догляду – фірми Smith Heimann. З рис. 2. можна бачити, що актуальною проблемою у митному контролі є розділення "легких" матеріалів (вибухівка, вода, шоколад, тощо).

Другий метод – характеристика матеріалів за співвідношенням сигналів двоенергетичної лінійки детекторів Н/Л (рис. 1б.). Такий метод було використано на початковому етапі досліджень. При розділенні матеріалів за співвідношенням сигналів, параметр розділення Н/Л згідно (1) має суттєву залежність від товщини та щільності ОК.

Третій метод, запропонований в роботі, використовує параметр, пропорційний масовому коефіцієнту ослаблення  $\mu_m(E)$ , тому забезпечує характеристику матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ , майже не залежно від товщини ОК.

Виходячи з аналізу енергетичної залежності  $\mu_m(E)$  для простих елементів із  $2 < Z \leq 42$  (енергія К – стрибка поглинання  $< 20\text{кеВ}$ ), можна зробити висновок, що отримання даних про поглинання об'єктом рентгенівського випромінювання у двох енергетичних діапазонах, дозволяє однозначно розділити матеріали, що мають різні значення  $Z_{\text{eff}}$ . Отримання даних у трьох та більше енергетичних діапазонах може бути використано для селективного виділення "важких" матеріалів, що мають енергію К – стрибка більше ніж  $20\text{кеВ}$ .

Розроблено метод обчислення параметра Р, пропорційного ефективному атомному номеру для двоенергетичної радіографії з застосуванням кусочно-лінійної апроксимації для двох та більше енергетичних діапазонів (рис. 3):

$$\mu_m(E) = a \cdot E + b \quad (3)$$

Метод надає базові співвідношення сигналів лінійки детекторів отриманих у різних енергетичних діапазонах: Н – високі енергії, М – середні енергії, L – низькі енергії.

Для I) та II) енергетичних діапазонів (рис. 3) з урахуванням (1) та (3) можна записати співвідношення:

$$\mu_{H/M} = \frac{\mu_m(E_3)}{\mu_m(E_2)} = \frac{\text{Ln}(I_0/H)}{\text{Ln}(I_0/M)} = \frac{a_{II} \cdot E_3 + b_{II}}{a_{II} \cdot E_2 + b_{II}} \quad (4)$$

$$\mu_{M/L} = \frac{\mu_m(E_2)}{\mu_m(E_1)} = \frac{\text{Ln}(I_0/M)}{\text{Ln}(I_0/L)} = \frac{a_I \cdot E_2 + b_I}{a_I \cdot E_1 + b_I} \quad (5)$$

де  $\mu_m(E)$  – масовий коефіцієнт ослаблення матеріалу (ОК);  $I_0$  - максимальний рівень сигналу (за відсутності ОК); Н, М, L – сигнали детекторів у різних енергетичних діапазонах.

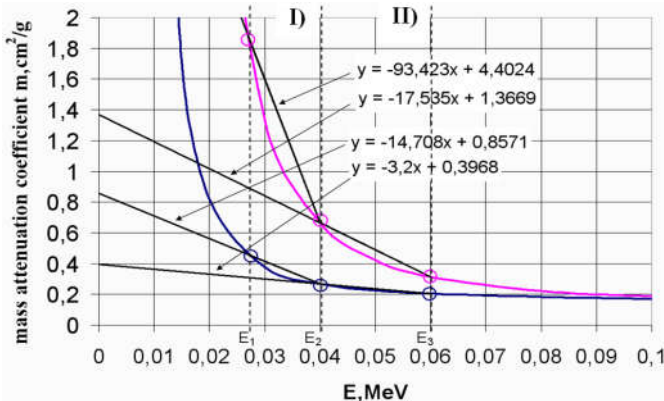


Рис. 3. Кусочно – лінійна апроксимація масового коефіцієнту ослаблення  $\mu_m(E)$  для двох різних матеріалів у двох енергетичних діапазонах (I та II).

Звідки знаходимо параметр характеристики для двох діапазонів енергій:

$$P(M, L) = a_I = \frac{(\ln(I_0 / M) / \ln(I_0 / L)) - 1}{E_2 - E_1 \cdot (\ln(I_0 / M) / \ln(I_0 / L))} \cdot b_I \quad (6)$$

$$P(H, M) = a_{II} = \frac{(\ln(I_0 / H) / \ln(I_0 / M)) - 1}{E_3 - E_2 \cdot (\ln(I_0 / H) / \ln(I_0 / M))} \cdot b_{II} \quad (7)$$

Коефіцієнти  $a$  визначають кут нахилу апроксимаційної прямої, та характеризують  $Z_{\text{eff}}$  матеріалу ОК.

Коефіцієнти  $b$  не можуть бути обчислені простим шляхом. Для усунення невизначеності, пов'язаної з коефіцієнтами  $b_I$  та  $b_{II}$  було запропоновано використати нормування значень  $\mu_m(E)$  – вважати, що для більшої з двох енергій кожного з діапазонів I та II, значення масових коефіцієнтів ослаблення є не нульовою, позитивною константою.

Запропоновано два методи візуалізації дво- та три- енергетичних зображень, а саме – кольорового розділення матеріалів, що відрізняються за  $Z_{\text{eff}}$ . Перший з використанням 2D мапи крапок, другий – з використанням 3D мапи крапок у координатах відповідного методу характеристики матеріалів.

У четвертому розділі наведено опис макетних зразків ЦРС, які було створено для експериментальної перевірки дво- та три- енергетичних методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ , наведено результати експериментальних досліджень.

Перший макет ЦРС дозволяє отримати двоенергетичні тіньові рентгенівські зображення ОК під різними кутами (рис. 4а). Другий макет ЦРС дозволяє отримати одночасно три тіньових зображення у трьох енергетичних діапазонах (рис. 4б). Наведено характеристики складових елементів макетів ЦРС.

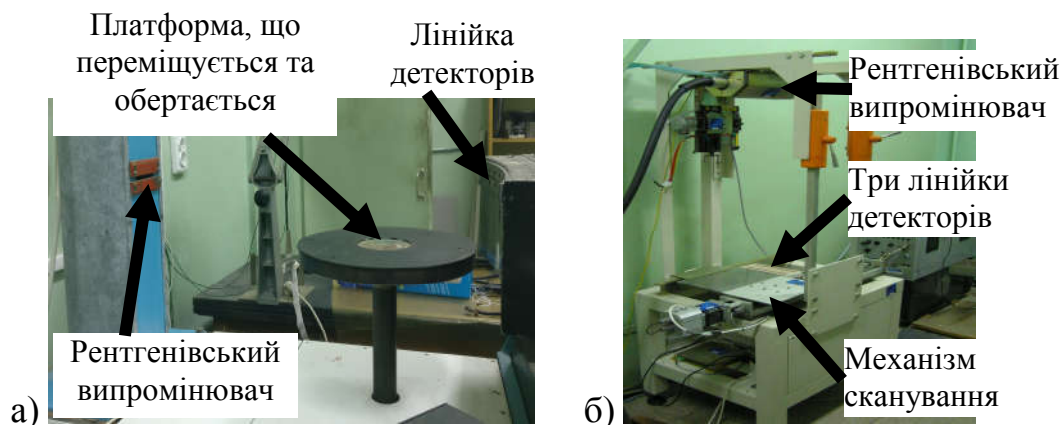


Рис. 4. Макети ЦРС для багаторакурсного (а) та триенергетичного (б) сканування.

Для оцінки можливостей застосування дво- та три- енергетичних ЦРС у митному контролі отримано тіньові рентгенівські зображення тестових ОК у різних енергетичних діапазонах.

У якості тестових ОК обрано тверді та сипучі матеріали із  $Z_{\text{eff}}$  від 6 до 29 (рис.5). Тверді матеріали (крім вуглецю) мають форму ступінчатого клину. Це дозволило визначити залежність параметра характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  від щільності та товщини ОК ( $\rho \cdot l$ ).

З використанням макету триенергетичної ЦРС було отримано три радіографічні зображення набору тестових ОК у трьох енергетичних діапазонах. Використовуючи 3D мапи крапок та RGB палітру, отримано триенергетичне радіографічне зображення тестових ОК (рис. 6.).

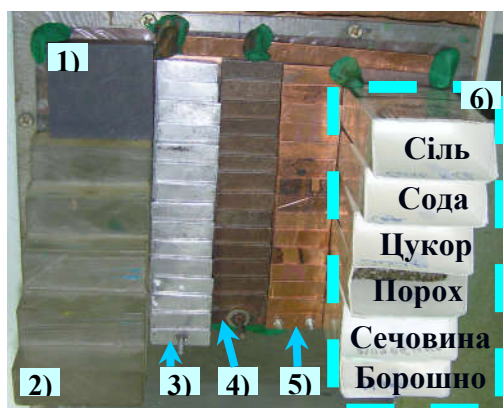


Рис. 5. Світлина тестових ОК: 1) Вуглець  $Z=6$ ; 2) Поліметилметакрилат  $Z_{\text{eff}}=6.48$ ; 3) Алюміній  $Z=13$ ; 4) Сталь  $Z=26$ ; 5) Мідь  $Z=29$ ; 6) Сіль  $Z_{\text{eff}} = 15.9$ ; Сода  $Z_{\text{eff}} = 8.76$ ; Цукор  $Z_{\text{eff}} = 6.93$ ; Сечовина  $Z_{\text{eff}}=6.83$ .

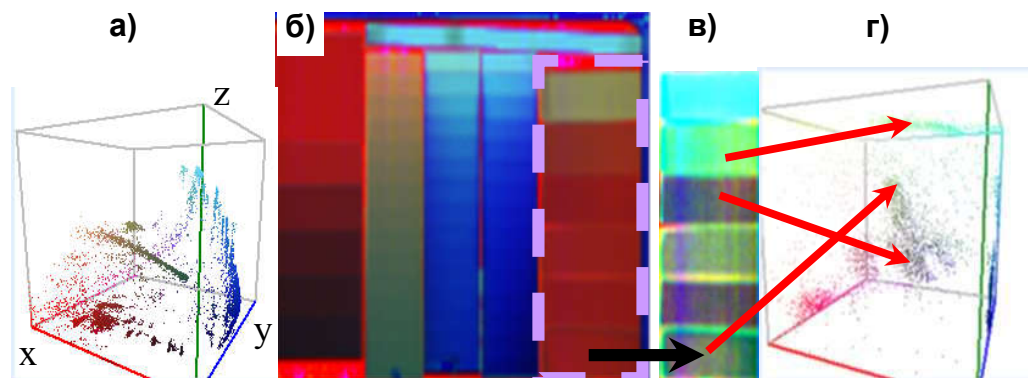


Рис. 6. Триенергетичне радіографічне зображення тестових ОК. а) - 3D RGB палітра, поєднана з 3D мапою точок - б); в) - фрагмент зображення - б), відображений за допомогою 3D палітри - г).

За результатами отримання триенергетичного зображення (рис.6) проведено порівняння трьох методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  для різних енергетичних діапазонів (рис.7).

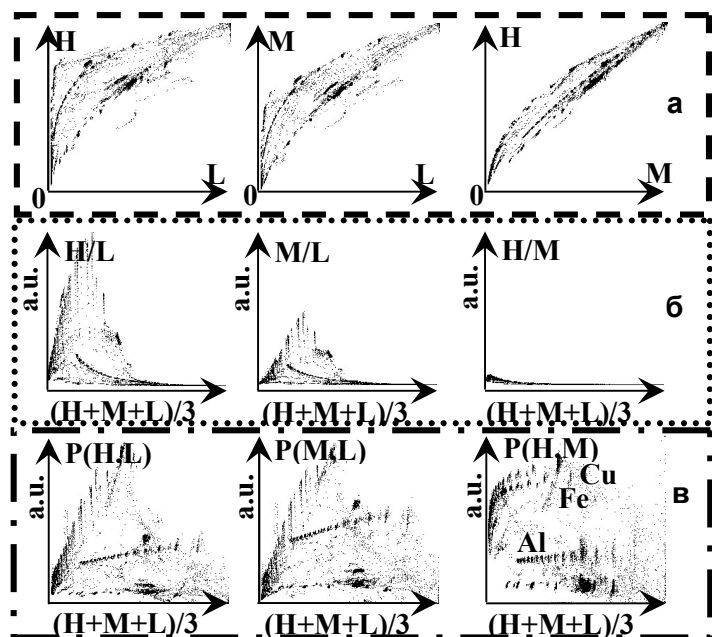


Рис. 7. 2D мапи крапок для трьох методів характеристики матеріалів:  
а) прямий метод характеристики;  
б) метод характеристики за співвідношенням сигналів  
в) метод характеристики з обчисленням параметра  $P \sim \mu_m$ .

Для розділення матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  використано 2D мапи крапок (рис.7), де кожному пікселю радіографічного зображення відповідає окрема крапка на площині у координатах сигналів детекторів H, M, L та похідних від них величин  $H/L$ ,  $M/L$ ,  $H/L$ ,  $P(H/L)$ ,  $P(M/L)$ ,  $P(H/M)$ , що характеризують ОК за  $Z_{\text{eff}}$  та  $(H+M+L)/3$  – що характеризує ослаблення потоку випромінювання.

Як можна бачити з рис. 7в, запропонований метод розділення матеріалів, з обчисленням параметра  $P(H/M) \sim \mu_m$ , дозволяє практично виключити вплив щільності і товщини матеріалу ( $\rho \cdot l$ ) на значення параметра характеристикації.

Для оцінки можливості характеристикації за  $Z_{\text{eff}}$  "легких" матеріалів, у якості тестових об'єктів було обрано воду ( $H_2O$ ,  $Z_{\text{eff}}=7,42$ ) та гліцерин ( $C_3H_8O_3$ ,  $Z_{\text{eff}}=6,87$ ). Світлина тестових об'єктів та мапа крапок, отримана за методом співвідношення сигналів, наведена на рис. 8. Обрані матеріали відрізняються за  $Z_{\text{eff}}$  приблизно на 7,5%. Як можна бачити з рис. 8б, двом рідинам відповідають дві групи крапок, що дозволяє виділити рідини різними кольорами. Таким чином, було показано, що "легкі" матеріали, які відрізняються за  $Z_{\text{eff}}$  на  $\approx 7,5\%$  можуть бути розділені.

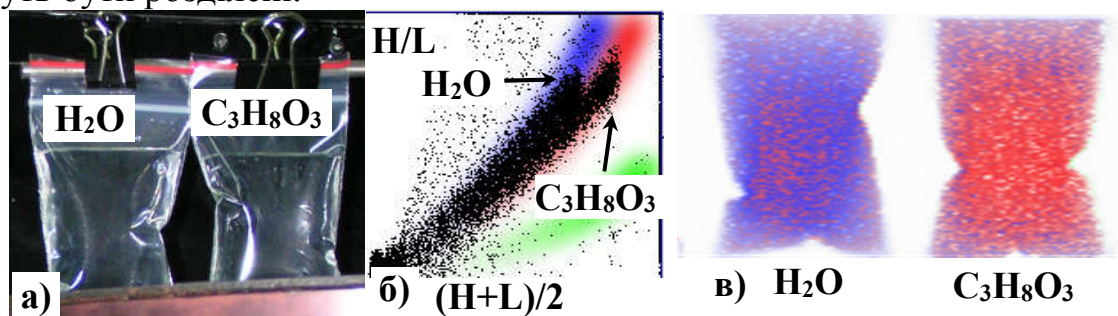


Рис. 8 Розділення води та гліцерину методом співвідношення сигналів ( $H/L$ ). а) - світлина тестових об'єктів ; б) - мапа крапок, отримана методом співвідношення сигналів; в) - двоенергетичне радіографічне зображення.

Для оцінки можливостей застосування ЦРС у медицині було використано біологічні ОК: фрагмент кістки корови та фрагменти свійської птиці (окорок бройлерної курки, окорок свійської курки, крило індика).

На першому етапі досліджень було отримано двоенергетичне псевдо об'ємне (60 ракурсне) зображення фрагменту кістки корови (рис. 9).

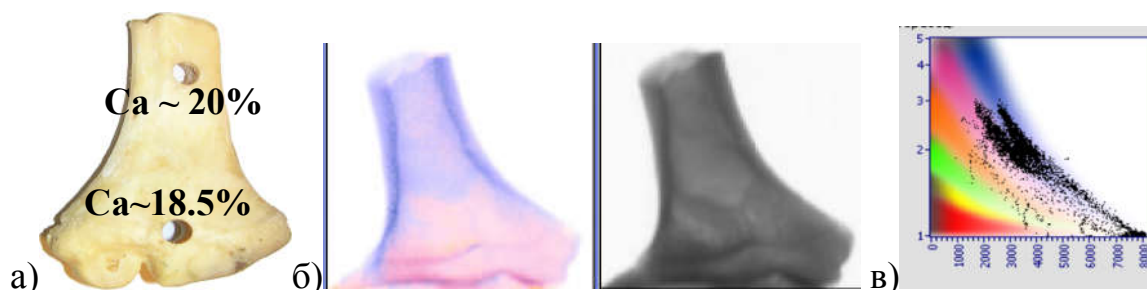


Рис. 9. Фрагмент кістки а); двоенергетичне та традиційне радіографічне зображення б); кольорова палітра та 2D мапа крапок в).

Багаторакурсне сканування, у поєднанні з методом характеристикації матеріалів за співвідношенням сигналів  $H/L$ , підтвердило можливість виявлення розподілу вмісту кальцію у кістці (рис. 9). Хімічний аналіз показав, що вміст кальцію у кортикальній частині кістки становить  $\approx 20\%$ , у губчастій

≈18,5% (рис. 9.а). Таким чином було показано, що можна виявити змінення вмісту кальцію в кістці на 1.5% (рис.9.б, в).

У медицині важливо виявити мінералізацію (діагностика остеопорозу) у кістковій тканині на фоні м'язової тканини, тому на другому етапі досліджень за допомогою макету триенергетичної ЦРС було отримано зображення зразків свійської птиці у трьох енергетичних діапазонах (рис. 10).

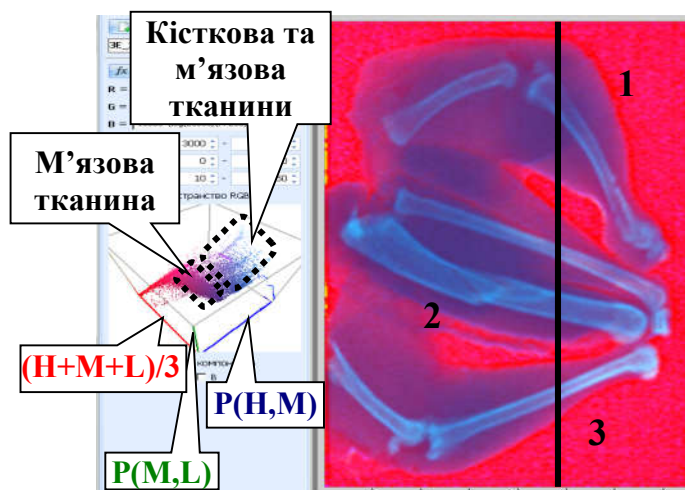


Рис. 10. Триенергетичне тіньове радіографічне зображення частин свійських птахів, побудоване з використанням 3D RGB палітри.

1) окорок бройлерної курки;

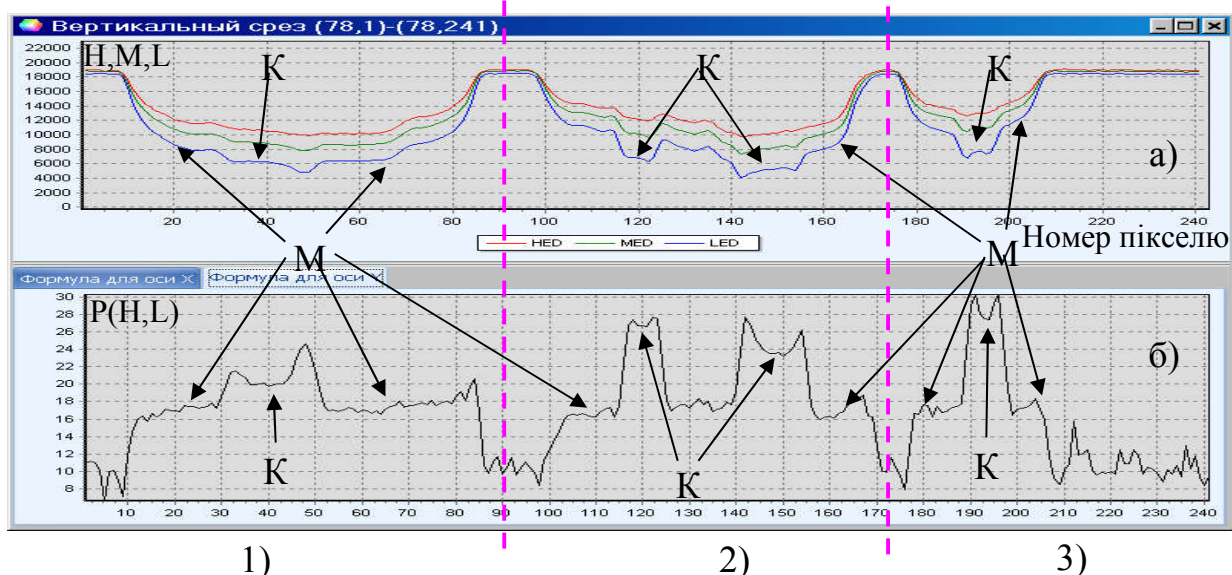
2) крило індика;

3) стегно домашньої курки.

Палітра (ліворуч) у координатах:

$R \sim (H+M+L)/3$ ;  $G \sim P(M,L)$ ;  $B \sim P(H,M)$ .

Використовуючи запропонований новий метод характеристики матеріалів за допомогою параметру  $P(H,L) \sim \mu_m$ , проведено характеристику кісткової тканини біологічних ОК на фоні м'язової тканини змінної товщини (рис.11). На рис. 11а наведено у графічному вигляді рівні сигналів 78 каналу лінійки детекторів відповідно до радіографічного зображення на рис. 10 (згідно вертикальному перерізу, позначеному чорною лінією).



1)

2)

3)

Рис. 11. Сигнали детекторів та значення параметру характеристики, що відповідають радіографічному зображенню, наведеному на рис.10 (відповідно вертикальному перерізу, позначеному чорною лінією). а) - сигнали детекторів Н, М, L, б) - значення параметру  $P(H,L)$ , К – відповідає кістковій тканині на фоні м'язової тканини; М – відповідає м'язовій тканині. 1), 2), 3) – відповідає позначкам 1, 2, 3 на рис. 10.

Показано (рис. 11 б), що при зміні товщини м'язової тканини (рис. 11 а) обчислений відповідно (6, 7) параметр  $P(H,L)$  фактично не змінюється.

У той же самий час, чітко можна бачити, що значення параметру  $P(H,L)$  для ділянок з кістковою тканиною, є пропорційним вмісту кальцію у кістковій тканині. За результатами хімічного аналізу вмісту кальцію у кістковій тканині біологічних ОК становить: 1) бройлерна курка –  $1,6 \div 2,8$  %; 2) крило індика –  $3,4 \div 4,4$  %; 3) домашня курка –  $2,8 \div 4,4$  %. Для діагностики остеопорозу використовують як традиційну радіографію (виявляє  $20 \div 40\%$  зміну мінералізації кісткової тканини) так і двоенергетичну рентгенівську абсорбціометрію (чутливість до зміни мінералізації  $2 \div 3\%$ ). З рис. 9. та рис. 10 можна бачити, що експериментально підтверджена можливість виявлення природного розподілу мінералізації кісткової тканини становить  $1 \div 2\%$ .

Застосування методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  у НК та ТД може бути пов'язане насамперед з виявленням неоднорідності сумішей матеріалів, що мають різні значення  $Z_{\text{eff}}$  та виявленням продуктів корозійних процесів, дифузією одних матеріалів у інші, тощо.

У п'ятому розділі проаналізовано основні чинники, які впливають на точність характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ . Проведено узагальнення результатів досліджень.

Для усунення впливу розкиду параметрів детекторів, який може становити до 30% ("темнові" струми та рентгеночутливість) було запропоновано та реалізовано механізм поканального змінення напруги зміщення та коефіцієнту підсилення на базі швидкодіючих комутаторів та цифро-аналогових перетворювачів (апаратне калібрування).

У скануючих ЦРС, наприклад для митного контролю, застосовуються попередні підсилювачі типу перетворювач струм-напруга з постійною часу 10мс. Тому, пульсації потоку рентгенівського випромінювання під час сканування (від декількох секунд до декількох хвилин) впливають на точність вимірювань. Сучасні рентгенівські апарати забезпечують стабілізацію як струму так і анодної напруги на рівні  $\pm 0,5\%$ .

При моделюванні сигналів двоенергетичної лінійки детекторів проведено оцінку похибки, пов'язаної з використанням аналого цифрового перетворювача (АЦП). При використанні 12 розрядного АЦП, та рівні коливань сигналу  $\pm 1$  у кодах АЦП, достовірність характеристики починає суттєво знижуватись при ослабленні початкового потоку рентгенівського випромінювання на  $\sim 97\%$ .

Як загально відомо, при радіографічних дослідженнях розсіяне випромінювання може суттєво погіршувати тіньові радіографічні зображення. На характеристику матеріалів розсіяне випромінювання також має суттєвий вплив. Використовуючи сталевий ступінчатий клин  $1 \div 15$ мм, були отримані три радіографічних зображення при трьох анодних напругах: 50, 100, 150 кВ. Рівні сигналів лінійки детекторів в залежності від товщини сталевго клину наведено на рис.12.

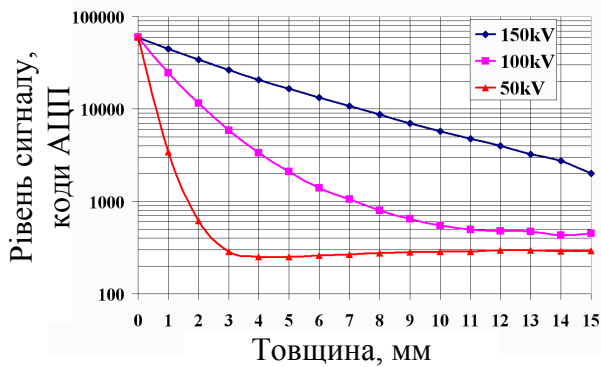


Рис. 12. Рівні сигналів ЛД, при просвічуванні сталевих клин, при різних анодних напругах.

Наведені в роботі методи характеристики матеріалів можуть бути використані не тільки у ЦРС, а й при створенні томографів нового покоління, де параметр  $P(H,L) \sim \mu_m$  може бути використаний для характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  у елементарному об'ємі (вокселі).

## ВИСНОВКИ

В дисертації розглянуто фізичні аспекти взаємодії рентгенівського випромінювання з різними матеріалами при радіографічному контролі. Проведено низку модельних обчислень сигналів двоенергетичного сцинтиляційного детектора. Запропоновано нове вирішення наукової проблеми характеристики матеріалів за ефективним атомним номером при використанні дво- та мульти- енергетичних цифрових радіографічних систем для медичної діагностики, митного контролю, неруйнівного контролю, тощо.

За результатами виконаної роботи, запропоновано новий метод обчислення параметра характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ , пропорційного масовому коефіцієнту ослаблення  $\mu_m(E)$ . Такий параметр дозволяє для матеріалів, що складаються з елементів із  $2 < Z \leq 42$  провести однозначну характеристику матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ .

Результати модельних обчислень та три методи характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  при радіографічному контролі пройшли експериментальну апробацію на базі двох макетних зразків ЦРС.

Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Визначено граничні умови та технічні можливості щодо отримання рентгенівського випромінювання у вузьких енергетичних "вікнах" для діапазону енергій  $20 \div 150$  кеВ. Експериментально підтверджено, що використовуючи зміну анодної напруги та фільтри з Al, Cu, матеріалів, що мають К стрибок поглинання (Ta, W, тощо), можна отримати рентгенівське випромінювання у енергетичних "вікнах"  $20 \div 50$  кеВ,  $50 \div 100$  кеВ,  $60 \div 150$  кеВ, тощо.

2. Результати проведеного моделювання співвідношення сигналів двоенергетичного детектора на базі сцинтиляційних кристалів ZnSe товщиною 0,5мм та CsI товщиною 4мм для об'єктів контролю різної товщини та з різним ефективним атомним номером (від  $Z_{\text{eff}} = 6.93$  до  $Z=29$ ), добре узгоджуються з експериментальними даними.

3. Моделювання сигналів детекторів пристрою для контролю параметрів рентгенівських випромінювачів дозволило порівняти енергоселективні властивості детекторів різних конструкцій та обрати більш ефективну конструкцію. Таким чином, було показано, що результати модельних обчислень можуть бути використані при розробці нових типів пристроїв радіаційного контролю та ЦРС на базі сцинтиляційних детекторів рентгенівського випромінювання.

4. Розроблено новий фізичний метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером, що дозволяє, використовуючи сигнали дво- та мульти- енергетичних детекторів, обчислити параметр, пропорційний масовому коефіцієнту ослаблення  $\mu_m$ , який практично однозначно пов'язаний з ефективним атомним номером  $Z_{\text{eff}}$ . Таким чином, була мінімізована залежність параметру характеристики від товщини та щільності ( $\rho \cdot l$ ) матеріалу ОК.

5. Обґрунтовано та сформульовано критерій однозначності характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  при дво- та мульти- енергетичних рентгенографічних дослідженнях: результати характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$  можна вважати однозначними, якщо хімічні елементи, з яких складається матеріал, не мають К стрибка поглинання у робочому діапазоні енергій рентгенівського випромінювання, що використовується при рентгенографічних дослідженнях.

6. Результати експериментальних досліджень, проведених на базі макетних зразків ЦРС довели можливість візуалізації розподілу мінералізації кісткової тканини на фоні м'язової тканини для біологічних ОК у межах зміни мінералізації на 1-2% за вмістом кальцію (діагностика остеопорозу) та розділення за  $Z_{\text{eff}}$  "легких" матеріалів із  $Z_{\text{eff}}$  від 7,06 до 8,07, що відрізняються на 6÷9% за  $Z_{\text{eff}}$  (митний контроль, протидія тероризму, тощо).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Increasing informativity of digital radiographic systems / **O.D. Opolonin**, V. D. Ryzhikov. // Functional materials. – 2013. – №4. – С. 528–533. <http://functmaterials.org.ua/contents/20-4/fm204-21.pdf>

2. Scintillation materials and detectors on their base for non-destructive two energy testing / V. D. Ryzhikov, B.V. Grinyov, **O.D. Opolonin**, S.V. Naydenov, S.N. Galkin, E.F. Voronkin. // Radiation Measurements. – 2007. – Volume 42. – Issue 4-5. – P. 915–920.

3. Dual-energy radiography of bone tissues using ZnSe-based scintielectronic detectors / B.V. Grinyov, V.D. Ryzhikov, P. Lecoq, S.V. Naydenov, **A.D. Opolonin**, S.N. Galkin, N.A. Shumeiko. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. – 2007. – Volume 571. – Issue 1-2. – P. 399–403.

4. A Dual-energy X-ray detector on the basis of ZnSe(Al) and LGSO(Ce)

composite scintillators / V.A. Litichevskiy, **O.D. Opolonin**, S.N. Galkin, A.I. Lalaiants, E.F. Voronkin . // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – Volume 56. – №4. – P. 436–443.

5. Instruments and detectors on the base of scintillator crystals ZnSe(Te), CWO, CsI(Tl) for systems of security and customs inspection systems / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, P.V. Pashko, V.M. Svishch, V.G. Volkov, E.K. Lysetskaya, D.N. Kozin, C. Smith . // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. –2005. Volume 537. – Issue 1-2. – SPEC. ISS. – P. 424-430.

6. Характеризація матеріалів за ефективним атомним номером при радіографічних дослідженнях / **Ополонін О.Д.**, Рижиков В.Д.. // Радіоелектроніка та інформатика. – 2020. – №3(90). – С. 38-43.

7. X-ray radiation detectors of "scintillator-photoreceiving device type" for industrial digital radiography with improved spatial resolution / V.D. Ryzhikov, E.K. Lysetskaya, **A.D. Opolonin**, D.N. Kozin . // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. – 2003. – Volume 505. – Issue 1-2. – P. 544-548.

8. Studies of two-energy linear detector matrix for X-ray osteodensitometry / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, S.V. Najdenov, D.N. Kozin, E.K. Lisetskaya, V.L. Danilenko. // Biomedical Engineering. –2005. – Volume 39. – Issue 2. – P. 65-68.

9. Detectors and instruments for detection of X-ray radiation on the basis of zinc selenide crystals / V.D. Ryzhikov, V. G. Volkov, **O.D. Opolonin**, S.V. Makhota, V.V. Maksymchuk . // Functional materials. – 2015. – №4. – P. 552-558.

10. The looking for new possibilities of improvement of receiving-detecting circuit for digital radiographic systems with advanced spatial resolution / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, B.V. Grinyov, V.G. Volkov, E.K. Lisetskaya, S.N. Galkin, E.F. Voronkin, V.L. Perevertaylo . // Functional materials. – 2011. – №3. – P. 398–402. <http://functmaterials.org.ua/contents/18-3/fm183-21.pdf>

11. The use of semiconductor scintillation crystals  $A^{IV}B^{VI}$  in radiation instruments / V.D. Ryzhikov, V.V. Chernikov, L.P. Gal'chinetskii, S.N. Galkin, E.K. Lysetskaya, **A.D. Opolonin**, V.G. Volkov . // Journal of Crystal Growth. – 1999. –Volume 197. – Issue 3. – P. 655-658.

12. Перспективы цифровой радиографии для идентификации веществ в инспектируемых объектах / В. Рыжиков, **А. Ополонин**, Е. Лисецкая, В. Даниленко, С. Галкин, Е. Воронкин // Науковий вісник Інституту економіки та нових технологій ім. Ю.І.Кравченка “Нові технології”. – 2005. – № 1-2(7-8). – С. 9-10.

13. Возможности двухэнергетического детектирования на основе пары «сцинтиллятор-фотодиод» в цифровой медицинской радиографии / В.Д. Рыжиков, **А.Д. Ополонин**, Д.Н. Козин, Е.К. Лисецкая, В.Л. Даниленко // Вісник НТУУ „Київський політехнічний інститут”. – серія „Приладобудування”. – 2005. – 29. – С. 128-134.

14. Multi-energy radiography on the basis of "scintillator-photodiode" detectors / V.D. Ryzhikov, S.V. Najdenov, B.V. Grinyov, E.K. Lysetskaya, D.N. Kozin, **A.D. Opolonin**, N.G. Starzhinskiy . // Nuclear Instruments and Methods

in Physics Research, Section A. – 2003. – Volume 505. – Issue 1-2. – P. 549-551.

15. Патент на корисну модель № 100966 України, МПК H05G1/26 (2006.01) Пристрій для контролю параметрів рентгенівських випромінювачів / В.Д. Рижиков, Б.В. Гриньов, В.Г. Волков, **О.Д. Ополонін**, С.В. Махота; власник Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України. – зареєстровано 25.08.2015.

16. Multi-energy method of digital radiography for imaging of biological objects / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, S.V. Naydenov, V.G. Volkov, C.F. Smith . // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE. – 2016. – Volume 9783. – N.978348.

17. A dual-energy medical instrument for measurement of x-ray source voltage and dose rate / V. D. Ryzhikov, S. V. Naydenov, V. G. Volkov, **O. D. Opolonin**, S.V. Makhota, T. Pochet, C.F. Smith . // Progress in Biomedical Optics and Imaging. – Proceedings of SPIE. – 2016. – Volume 9783 – №97834X.

18. Three-energy radiography method for uniformity control of composite materials including components with different effective atomic numbers / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, B.V. Grinyov та ін. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2013. – Volume 8852. – № 88521J.

19. Research on improvement of Receiving-Detecting circuit for digital radiographic systems with advanced spatial resolution / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, O. K. Lysetska та ін. . // RILEM Bookseries. – 2012. – Volume 6. – P. 105–109.

20. Capabilities of dual-energy x-ray imaging in medicine and security / V.D. Ryzhikov, B.V. Grinyov, **O.D. Opolonin** та ін. . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2012. – Volume 8509. – №. 85090j.

21. Detector array with improved spatial resolution for digital radiographic system / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, S.M. Galkin S.M. та ін. . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering – 2011. – Volume 8142. – №81421C.

22. X-ray radiation detectors of "scintillator-photodiode" type for security and nondestructive testing / V. D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, Galkin S.M. та ін. . // IEEE Nuclear Science Symposium – 2011. – Conference Record №6154450. – P. 2204-2207.

23. A multi-energy method of non-destructive testing by determination of the effective atomic number of different materials / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, S.M. Galkin та ін. . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering – 2010. – Volume 7805. – №.78051P.

24. Development of receiving-detecting circuit for digital radiographic systems with improved spatial resolution / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, S.M. Galkin та ін. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2009. – Volume 7450. – №.74500J.

25. New application of scintillator ZnSe(Te) in scintielelectronic detectors for detection of neutrons, medical imaging, explosive detection and NDT / V.D. Ryzhikov, **O.D. Opolonin**, A.G. Fedorov та ін. . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2008. – Volume 7079. – №.70791A.

26. ZnSe(Te)-based crystals and detectors for nondestructive testing and cargo inspection / V. P. Seminozhenko, V. D. Ryzhikov, **A. D. Opolonin**, O.K. Lysetska, S.N. Galkin, E.F. Voronkin, S.A. Kostyukevich . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2006. – Volume 6319. – №63191B.

27. Medical dual-energy imaging of bone tissues using ZnSe-based scintillator-photodiode detectors / B. V. Grinyov, V.D. Ryzhikov, S.V. Naydenov, **A.D. Opolonin**, E.K. Lisetskaya, S.N. Galkin, P. Lecoq . // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. – 2006. – Volume 3. – №4179388. – P. 1945–1949.

28. Radiation detectors scintillator-photodiode on the base of A2B6 crystals for application in homeland security and medical equipment / B.V. Grinyov, V.D. Ryzhikov, S.V. Naydenov, C.F. Smith, **A.D. Opolonin**, E.K. Lisetskaya, N.A. Shumeiko, N.L. Kurna, G.M. Onischenko, S.E. Tretyak, S.N. Galkin, E.F. Voronkin . // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. – 2006. – Volume 2. – №4179199. – P. 1134-1138.

29. Distinguishing materials in inspected objects by digital radiography / V. Ryzhikov, O. Lysetska, A. Opolonin, V. Danilenko, S. Galkin, E. Voronkin, S. Kostyukevich . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2005. – Volume 5922. – №592211. – P. 1-9.

30. Searching for reserve for expansion of the possibilities two-energy radiography / V.D. Ryzhikov, S.V. Najdenov, **O.D. Opolonin**, V.G. Volkov, E.K. Lysetskaya, D.N. Kozin, V.L. Danilenko . // 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. – 2005. – P. 157-163.

31. Active multichannel scintielectronic detectors of new generation based on zinc selenide / V.D. Ryzhikov, N.G. Starzhinskiy, S.O. Kostyukevich, D.N. Kozin, L.P. Gal'chinetskii, **A.D. Opolonin** . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 1999. – Volume 3768. – P. 457-461.

32. X-ray introsopic digital systems of non-destructive testing based on "SELDI" detectors / V.D. Ryzhikov, L.P. Gal'chinetskii, **A.D. Opolonin**, V.M. Svishch, E.M. Selegenev, . // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.– 1997. – Volume 3359. – P. 416-419.

33. A new x-ray security instrument based on the method of three-energy digital radiography / V. Ryzhikov, **A. Opolonin**, S. Naydenov, A. Krylov. // Proceedings of Security research conference: 11<sup>th</sup> Future Security. – 2016. – P. 501-504.

## АНОТАЦІЯ

**Ополонін О.Д. Принципи характеризації матеріалів за ефективним атомним номером при радіографічному контролі.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2021.

Дисертація присвячена проблемі характеристики матеріалів за ефективним атомним номером  $Z_{\text{eff}}$  при радіографічному контролі (медична діагностика, митний догляд, тощо).

За результатами роботи набув подальшого розвитку метод двоенергетичної абсорбціометрії (Dual-energy X-ray Absorptiometry - DXA, раніше DEXA), що базується на вимірюванні ослаблення рентгенівського випромінювання (РВ) об'єктом контролю (ОК) у двох енергетичних діапазонах.

В роботі запропоновано новий фізичний метод характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ , що дозволяє визначити параметр, пропорційний масовому коефіцієнту ослаблення  $\mu_m$ , який є пов'язаним з  $Z_{\text{eff}}$  та не залежить від товщини та щільності матеріалу ОК. Метод пройшов експериментальну апробацію.

Проведено моделювання співвідношення сигналів двоенергетичного детектора на базі сцинтиляційних кристалів ZnSe товщиною 0,5мм та CsI товщиною 4мм для ОК різної товщини та з різним ефективним атомним номером (від  $Z_{\text{eff}} = 6.93$  до  $Z=29$ ).

На базі створених двох макетних зразків цифрових радіографічних систем отримано низку радіографічних зображень тестових об'єктів контролю у різних енергетичних діапазонах. Отриманні радіографічні зображення дозволили провести порівняння різних методів характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ .

В роботі розглянуто основні фактори, що впливають на точність характеристики матеріалів за  $Z_{\text{eff}}$ : розсіяне випромінювання; пульсації потоку рентгенівського випромінювання; розкид параметрів детекторів, шуми квантування АЦП, тощо.

**Ключові слова:** радіографія, ефективний атомний номер, сцинтилятор, фотодіод, детектор рентгенівського випромінювання, масовий коефіцієнт ослаблення, двоенергетична рентгенівська абсорбціометрія.

## АННОТАЦИЯ

**Ополонин А.Д. Принципы характеристики материалов по эффективному атомному номеру при радиографическом контроле. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена проблеме характеристики материалов по эффективному атомному номеру  $Z_{\text{eff}}$  при радиографическом контроле (медицинская диагностика, таможенный досмотр и т.д.).

По результатам работы получил дальнейшее развитие метод двухэнергетической абсорбциометрии (Dual-energy X ray Absorptiometry - DXA, ранее DEXA), основанный на измерении ослабления рентгеновского излучения (РИ) объектом контроля (ОК) в двух энергетических диапазонах.

В работе рассмотрены и использованы два способа получения данных об ослаблении РИ объектом контроля в двух и более энергетических диапазонах

1) изменение спектра РИ; 2) использование энергоселективных детекторов РИ. Определены условия получения "узкополосных" спектров РИ (20÷50кeB, 50÷70кeB, 60÷150кeB и др.) и исследованы энергоселективные свойства детекторов РИ типа сцинтиллятор-фотодиод (СЦ-ФД).

Проведено моделирование соотношения сигналов двухэнергетического сцинтилляционного детектора РИ типа СЦ-ФД базе сцинтилляторов ZnSe, толщиной 0,5 мм и CsI, толщиной 4 мм. По результатам модельных расчетов, получено соотношение сигналов двухэнергетического детектора, при прохождении РИ через ОК различной толщины с различным значением  $Z_{\text{eff}}$ .

Моделирование сигналов двухэнергетического детектора типа СЦ-ФД позволило оценить соотношение сигналов детекторов при изменении анодного напряжения на рентгеновской трубке. Результаты расчетов были использованы при создании прибора для контроля параметров рентгеновских излучателей.

По результатам анализа физических аспектов взаимодействия РИ с веществом, сформулирован критерий однозначности характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$  при радиографических исследованиях для диапазона энергий 20÷150кeB.

В работе предложен новый физический метод характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$ , позволяющий рассчитать параметр, пропорциональный массовому коэффициенту ослабления  $\mu_m$ , который является связанным с  $Z_{\text{eff}}$  и не зависит от толщины и плотности материала ОК.

Изготовлено два макета цифровых радиографических систем, которые позволили провести экспериментальное сравнение различных методов характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$  при радиографическом контроле.

Применение нового физического метода характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$  позволило разделить имитаторы взрывчатых веществ (тротил  $Z_{\text{eff}} = 7,06$ ; гексоген  $Z_{\text{eff}} = 7,22$ ; пироксилин  $Z_{\text{eff}} = 7,43$ ; и т.д.), отличающихся по  $Z_{\text{eff}}$  на  $\approx 7\div 9\%$ . Оценены возможности метода для диагностики остеопороза. В костной ткани обнаружено изменение минерализации (по кальцию) от 20% до 18,5% (в сухом остатке).

В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на точность характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$ : влияние рассеянного излучения; пульсации потока рентгеновского излучения; разброс параметров детекторов, шумы квантования АЦП и др..

Практическое значение работы определяется широким кругом использования предложенного физического метода характеристики материалов по  $Z_{\text{eff}}$  (таможенный досмотр и противодействие терроризму, медицина, неразрушающий контроль и т.д.). Кроме радиографии, где по  $Z_{\text{eff}}$  характеризуется каждый пиксель изображения, метод может быть использован в томографии, для характеристики по  $Z_{\text{eff}}$  каждого вокселя объемного изображения.

**Ключевые слова:** радиография, эффективный атомный номер, сцинтиллятор, фотодиод, детектор рентгеновского излучения, массовый коэффициент ослабления, двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия.

## ABSTRACT

**Opolonin O.D. Principles of characterization of materials by effective atomic number in radiographic control.** – Manuscript.

The thesis for scientific degree of Candidate in physics and mathematics on specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2021.

The dissertation solves the problem of increasing the informativity of radiographic control by improving the method of separation of substances and materials by the effective atomic number  $Z_{\text{eff}}$ .

For the first time, a method for separating substances according to  $Z_{\text{eff}}$  has been proposed, which makes it possible, using signals from two- and multi- energy detectors, to determine a parameter, proportional to the mass attenuation coefficient  $\mu_m$  in the energy range 20 - 150 keV.

The signal ratio of a dual-energy detector based on 0.5 mm thick ZnSe scintillation crystals and 4 mm thick CsI for test objects with different effective atomic number (from  $Z_{\text{eff}} = 6.93$  to  $Z = 29$ ) was modeled.

Based on the created two prototypes of digital radiographic systems, a number of radiographic images of test objects in different energy ranges were obtained. The obtained radiographic images allowed to compare different methods of characterization of materials and substances according to  $Z_{\text{eff}}$ , and also confirmed the effectiveness of the proposed method in medicine, customs control, etc. The key factors influencing the accuracy of  $Z_{\text{eff}}$  characterization of materials and substances are investigated.

**Keywords:** radiography, effective atomic number, scintillator, X-ray detector, mass attenuation coefficient, dual-energy x-ray absorptiometry.





Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 392-21.  
Підписано до друку 13.07.2021. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.  
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (066) 822-71-30  
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру  
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

---

**СТИЛЬ** ®  
**ИЗДАТ**   
ТИПОГРАФИЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)