

# FEATURES OF APPLICATION OF DIGITAL PHOSPHORIC PLATES FOR STUDY-ING OF HOT PARTICLES BY RADIOGRAPHIC METHOD

Demchuk V.V., Martynyuk O.V., Troyan L.V., Fedorenko O.V.

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФОСФОРНИХ ПЛАСТИН ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРЯЧИХ ЧАСТИНОК РАДІОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

**Р**

**ДЕМЧУК В.В.,  
МАРТИНЮК О.В.,  
ТРОЯН Л.В.,  
ФЕДОРЕНКО О.В.,**  
ДУ "Інститут гігієни  
та медичної екології  
ім. О.М. Марзєєва  
АМН України",  
м. Київ

УДК 539.1.074: 614.876

робота підприємств ядерно-енергетичного комплексу пов'язана з одержанням, використанням і переробкою великої кількості радіоактивних речовин з високою питомою активністю. Причому у багатьох технологічних процесах, що використовуються, існує потенційна можливість виникнення так званих "гарячих частинок" — радіоактивних частинок малих розмірів (0,1-200 мкм) з високою активністю [1].

Не дивлячись на велику кількість "технологічних бар'єрів", що створюються при сучасному рівні технологій, на жаль, неможливо досягти абсолютної герметизації радіоактивних зон і повністю виключити ймовірність потрапляння радіоактивних речовин у навколишнє середовище, зокрема у вигляді гарячих частинок. Внаслідок малих розмірів ймовірність потрапляння частинок до організму людини і виникнення біологічної небезпеки є досить високою [2]. Тому ра-

діаційний контроль зовнішнього середовища на підприємствах атомної енергетики, який здійснюється за середніми показниками вмісту радіоактивних речовин у пробах, не можна вважати достатнім. Для забезпечення захисту населення і персоналу підприємств необхідно знати джерела і механізми виникнення радіоактивних частинок, місця їхньої концентрації, а також радіонуклідний, дисперсний та ізотопний склад.

Актуальність дослідження гарячих частинок та визначення їхніх характеристик особливо яскраво висвітлилася під час ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, оскільки радіоактивні речовини, що потрапили у довкілля, перебували здебільшого саме у вигляді гарячих частинок (диспергованого ядерного палива) — до 90%.

Для виявлення гарячих частинок і визначення їхніх характеристик (розмірів, активності) спочатку застосовувалися методи, які використовують газорозрядні лічильники або сцинтиляційні детектори з електронно-оптичними перетворювачами. Однак швидко з'ясувалося, що вони дозволяють працювати з частинками відносно великої питомої активності (декілька десятків Бк) та в обмеженому діапазоні розмірів — понад 15-20 мкм. Спроби седиментаційного розділу (центрифугування у важких рідинах та розділення за фракціями на ядерних фільтрах) також не забезпечували прийнятної похибки (менше 50%).

Найбільш придатним для визначення параметрів дисперсного розподілу гарячих частинок у зразках навколишнього середовища у діапазоні розмірів від 0,1 мкм до 200 мкм виявився метод контактної радіо-

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ФОСФОРНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ЧАСТИЦ РАДИОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Демчук В.В., Мартынюк О.В., Троян Л.В., Федоренко О.В.**

Обсуждается возможность применения цифровой радиографии с использованием фосфорных пластин для измерения дисперсного распределения радиоактивных (горячих) частиц. Сравниваются характеристики регистрации на рентгеновской пленке и фосфорных пластинах (динамический диапазон, чувствительность, разрешающая способность).

На основании анализа материалов делаются выводы о возможности апробации фосфорной технологии для количественного определения дисперсного состава горячих частиц. Допускается, что высокая чувствительность фосфорных пластин позволит сократить время экспозиции, а их большой динамический диапазон позволит исследовать пробы разных активностей. Оговаривается, что для обеспечения работ необходима разработка методик подготовки образцов, калибровки и выполнения измерений, а также разработка специализированного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** радиография, цифровая радиография, радиоактивные частицы, горячие частицы, фосфорные пластины, рентгеновская пленка, фторбромйодид бария.

графії, який з 1960-х років використовувався для дослідження радіоактивних випадів після проведення ядерних випробувань [3].

### Метод контактної радіографії з використанням рентгенівської плівки

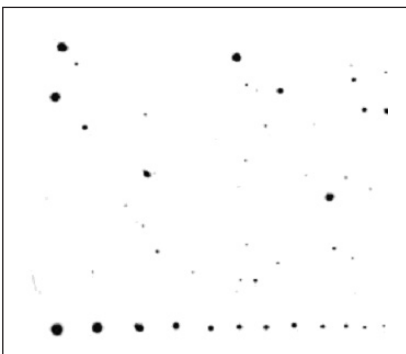
В основі методу контактної радіографії лежить відоме явище утворення "прихованого зображення" у фотоматеріалі [4, 5]. Для створення радіограми проба, що вивчається, контактує з фоточутливим шаром рентгенівської плівки і експонується протягом заданого часу. Механізм утворення "прихованого зображення" під дією ядерного випромінювання може бути виражений схемою:



де **E** — порція енергії, що передається кристалу галогеніда срібла. Після проявлення фотоматеріалу у місцях контакту з радіоактивними частинками спостерігаються плями почорніння (рис. 1).

Слід зазначити, що  $\gamma$ -кванти взаємодіють тільки з окремими кристалами, не утворюючи треків у фотоемульсії. Тому

*Рисунок 1*  
**Радіографічне зображення проби ґрунту (у нижній частині малюнка — лінійка калібрувальних зразків чорнобильського походження з відомою активністю)**



ефективність фотографічної дії  $\gamma$ -квантів високих енергій мала і для енергій  $>50$  кеВ становить 0,1-1,0% ефективності дії  $\beta$ -частинок.  $\alpha$ -частинки утворюють треки у фотоемульсії. Проте внаслідок прямолінійності траєкторії руху, малої величини їхнього пробігу у речовині і малої питомої  $\alpha$ -активності проб (приблизно у 100 разів меншої, ніж  $\gamma$ - або  $\beta$ -активність) фотографічна дія  $\alpha$ -частинок також незначна.  $\beta$ -частинки за рахунок багаторазового розсіювання проходять у фотоемульсії значну відстань і передають енергію великій кількості кристалів галогеніда срібла. Тому "приховане зображення" формується переважно  $\beta$ -частинками.

Оскільки діаметри плям залежать від енергії частинок, їхньої активності, часу експозиції, а також низки інших чинників (геометрії вимірювань, типу вживаної плівки, умов її обробки тощо), то після відповідних процедур калібрування з радіограм можна отримати інформацію про розміри і активність частинок [6].

Не дивлячись на те, що метод контактної радіографії найприйнятніший для вивчення дисперсного складу гарячих частинок, застосування рентгенівської плівки створює певні практичні незручності. По-перше, для проб, що мають малу активність, час експозиції може сягати 10-15 діб. Внаслідок тривалих експозицій втрачається оперативність методу. По-друге, повторюваність результатів дуже залежить від режиму проявлення плівки (температури, часу). Крім того, результати залежать від таких погано контрольованих чинників, як тривалість зберігання проявника і ступінь його виснаження за рахунок багаторазових застосувань. До всього візуальний перегляд радіограм і визначення розмірів плям за допомогою мікроскопа є тривалим і трудомістким процесом.

Якщо останню проблему можна усунути, застосувавши засоби обчислювальної техніки (за допомогою сканера створюється цифрова копія радіограми і потім обробляється за спеціальною програмою у комп'ютері [6, 7]), то перші дві проблеми можна

розв'язати лише за рахунок альтернативної технології реєстрації рентгенівського зображення.

### Цифрова радіографія з використанням фосфорних пластин

Нині у медицині [8, 9] і промисловості [10, 11] як альтернативний спосіб реєстрації рентгенівського випромінювання у діапазоні енергій 30-100 кеВ широко використовуються технологія цифрової радіографії із застосуванням фосфорних пластин. Ця технологія базується на досягненнях таких галузей сучасної науки, як цілеспрямоване створення матеріалів із заданими властивостями, фізика лазерів, реєстрація і обробка сигналів за допомогою комп'ютерів.

Основою фосфорних пластин є фторбромйодид барію, активований двовалентним європієм:  $(\text{BaFBr})/\text{I:Eu}^{2+}$ . Це поєднання є кристалофосфором і має здатність "запам'ятовувати" результат дії радіоактивного випромінювання у вигляді "прихованого зображення".

Введення добавок європію у фторбромйодид барію спричиняє утворення точкових дефектів кристала (вакансій). Під дією ядерного опромінення у речовині у надлишку генеруються вільні електрони [12], які утворюють стійку зв'язану систему електрон-вакансія. Ця система має характерний спектр поглинання в оптичному діапазоні, що визначає забарвлення кристалів. Тому її називають центром забарвлення [5, 13]. Причому кількість центрів забарвлення, що утворюються, виявляється пропорційною інтенсивності ядерного опромінення у широкому діапазоні енергій. Після опромінювання центри забарвлення здатні існувати тривалий час, забезпечуючи збереження "прихованого зображення" протягом прийнятого для практичної мети часу (декілька годин).

Для зчитування "прихованого зображення" використовується характерна для фторбромйодиду барію властивість фотостимульованої люмінесценції. Як джерело стимулюючого монохроматичного опромінення використовується лазер з довжиною хвилі

## FEATURES OF APPLICATION OF DIGITAL PHOSPHORIC PLATES FOR STUDY-ING OF HOT PARTICLES BY RADIOGRAPHIC METHOD

**Demchuk V.V., Martynyuk O.V., Troyan L.V., Fedorenko O.V.**

It is discussed possibility of application of digital radiography using phosphoric plates for studying of disperse distribution of hot particles. Specifications of the registration in X-ray film are compared to those in phosphoric plates (dynamic range, sensitivity, separating power). Conclusions about approval possibility of phosphoric technology for quantitative determination

of the powder of hot particles are drew. It is admitted that fast response of phosphoric plates will allow to cut time of exposure and its wide dynamic range will ensure sample research in wide range of activities. It is emphasized that for work supporting it will be necessary development of the methods of samples preparation, calibration, measuring and development of specialized software.

**Keywords:** radiography, contact radiography, digital radiography, radioactive particles, hot particles, phosphoric plates, X-ray film, barium fluorobromide.

470-570 нм, а стимульоване випромінювання спостерігається у вузькій смузі синього світла з довжиною хвилі близько 390-400 нм [14]. Інтенсивність випромінювання є кількісним мірилом "прихованого зображення", оскільки вона напряму залежить від концентрації центрів забарвлення, яка, у свою чергу, пропорційна дозі опромінення, отриманій під час експонування.

Для практичного застосування надзвичайно важливими є такі властивості фторбромиду барію:

1. Спектр випромінювання зміщений щодо спектру поглинання, що дозволяє розділити їх за допомогою оптичного фільтру;

2. Всі переходи електронів, які відбуваються у процесі фотостимульованої люмінесценції, потребують мало часу ( $\sim 0,8 \cdot 10^{-6}$  с), що дозволяє зчитувати "приховане зображення" з високою швидкістю.

### Структура фосфорних пластин і конструкція зчитувального пристрою

Фосфорна пластина (рис. 2) є багатошаровою структурою [13, 14]. Основним (робочим) шаром є нанесений на поліефірну основу шар мікрокристалів люмінофора. Залежно від призначення пластин, фірми-виробника і рівня технології як люмінофори можуть використовуватися композиції: BaFBr:Eu<sup>2+</sup> [14], BaFBr/I:Eu<sup>2+</sup> [15] або BaSrFBr/I:Eu<sup>2+</sup> [16].

Полікарбонатна підкладка чорного кольору запобігає скручуванню пластини, утворенню ореолів під час зчитування зображення, а також містить речовини, які зменшують тертя при проходженні пласти-

### Рисунок 2 Багатошарова структура фосфорної пластини

Захисне покриття (0,08-0,3 мкм)
Фосфорний шар (0,08-0,3 мкм)
Прозора підкладка (0,18 мкм)
Чорна підкладка

ни через зчитувальний пристрій (сканер).

Негативною властивістю фторбромиду барію є його гігроскопічність. Тому для захисту від небажаного зовнішнього впливу (вологи, відбитків пальців тощо) на пластини нанесено захисне покриття з вологостійкого полімерного матеріалу. Проте це покриття має дуже малу товщину (5-15 мкм), щоб не спотворювати результати зчитування зображення за рахунок розсіювання або поглинання світла. Внаслідок цього пластини мають обмежений опір механічній дії.

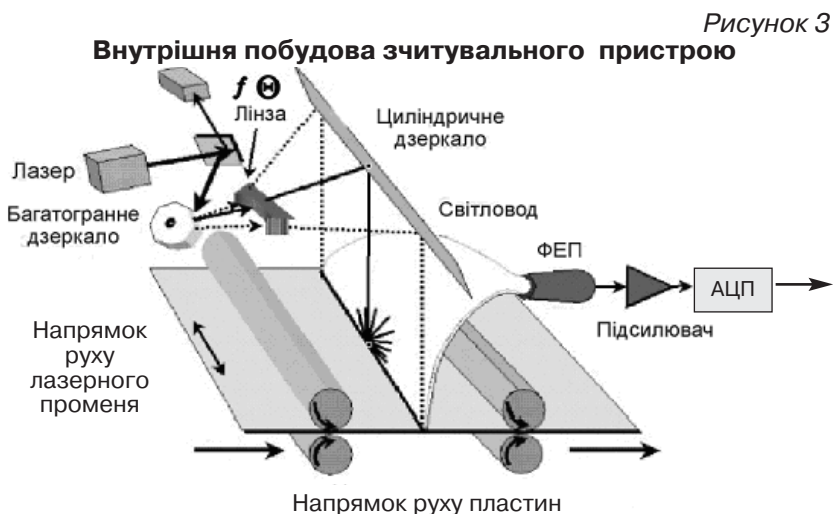
### Конструкція зчитувального пристрою

Для зчитування "прихованого зображення" необхідно на кожну точку експонованої фосфорної пластини почергово напра-

вити промінь монохроматичного джерела (лазера) і зареєструвати інтенсивність стимульованого люмінесцентного випромінювання у цій точці. Найпоширенішу конструкцію зчитувального пристрою, що реалізує растровий спосіб зчитування зображення, подано на рис. 3 [8].

Промені лазера за допомогою дзеркала (частково прозорого) спрямовується на багатогранне дзеркало, що обертається. При обертанні багатогранного дзеркала відбувається періодична зміна кутів умов віддзеркалення, внаслідок чого напрямок лазерного променя також періодично змінюється. Віддзеркалений від багатогранного дзеркала промінь за допомогою циліндричного дзеркала спрямовується перпендикулярно площині пластини. Оскільки оптична довжина шляху від лазера до пластини змінюється у процесі сканування (залежить від кута), то на шляху променя встановлюється "f-Q-лінза", що дозволяє зберігати фокусування "f" при різних кутах відхилення "Q".

Люмінесцентне випроміню-





Таблиця 1

**Порівняння споживацьких властивостей фосфорних пластин і рентгенівської плівки**

Характеристика	Фосфорні пластини	Рентгенівська плівка
Обробка зображення та кількісний аналіз	Безпосереднє зчитування зображення та його обробка у комп'ютері за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення	Потребує фотометрирування зображення або вводу у комп'ютер з допомогою сканера
Сумісність	Геометричні розміри фосфорних пластин і рентгенівських плівок сумісні. Для роботи з фосфорними пластинами можна використовувати свинцеві екрани і касети, призначені для рентгенівської плівки	
Витрати часу на обробку одного зображення	Безпосереднє зчитування після завершення експозиції. Час зчитування одного зображення від 30 с до 5 хв залежно від розміру пластини, конструкції і призначення пристрою. Додаткові витрати часу на стирання зображення перед повторним використанням	Після експонування потрібна фотохімічна обробка і сушіння знімків. Додаткові витрати часу на сканування зображення у випадку комп'ютерної обробки
Кратність використання	Багаторазове використання (понад 10 тисяч разів без втрати якості). Відсутність витратних матеріалів	Одноразове використання. Потрібні витратні матеріали (плівка, хімікати, вода)
Розміри обладнання	Зчитувальний пристрій для фосфорних пластин потребує менше місця, ніж машина для проявлення рентгенівської плівки або обладнання фотолабораторії	
Освітлення робочих приміщень	Необхідна затемнена кімната, але повне затемнення не потрібне. Освітлення — лампа розжарювання малої потужності	Необхідне повне затемнення приміщення. Освітлення — червоний ліхтар неактинічного світла
Зберігання даних	У вигляді файлів на жорсткому диску комп'ютера і архівних копій на лазерних дисках	Архів радіограм (потрібне додаткове приміщення)
Застосування сучасних інформаційних технологій	Просте створення комп'ютерної мережі, ведення електронних архівів зображень і баз даних	Потрібне попереднє перетворення зображення у цифровий код за допомогою сканера
Утилізація відходів	Для запобігання потрапляння у довкілля сполук важких металів потрібна спеціальна утилізація плівок, пластин і хімікатів	
Економічні показники	Інвестиції тотожні витратам на устаткування фотолабораторії і придбання оптичного сканера. Низька собівартість одного знімка	Помірні повсякденні витрати на матеріали і плівку, а також на розвиток лабораторії

вання захоплюється на поверхні пластини світловодом і надходить на фотоелектронний помножувач (ФЕП). Для відокремлення випромінювання стимульованої люмінесценції від променя лазера, віддзеркаленого від поверхні пластини, перед вхідним вікном ФЕП у синій частині спектру встановлюється прозорий фільтр. Сигнал з виходу ФЕП через підсилювач надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що формує на виході числовий код, пропорційний інтенсивності реєстрованого випромінювання.

Далі числовий код надходить до комп'ютера (на рис. 3 не показаний), де власне і формується радіографічне зображення у вигляді впорядкованого числового масиву. Подальші операції із зображенням (збереження у вигляді файлу на диску, обробка за спеціальною програмою, візуалізація на екрані дисплея тощо) цілком визначаються можливостями обчислювальної техніки і програмного забезпечення.

### **Фосфорні пластини і рентгенівська плівка. Порівняння технологій**

Завдяки безперервному розширенню сфери застосування цифрової радіографії тема порівняння переваг і недоліків фосфорних пластин і рентгенівської плівки присутня у багатьох роботах [8-11]. Споживацькі властивості, за якими найчастіше порівнюють технології, узагальнено у вигляді таблиці 1.

По низкою показників переваги застосування фосфорної технології виявилися такими очевидними, що нині вона значною мірою потіснила традиційне застосування рентге-

нівської плівки у медичній рентгенівській діагностиці та неруйнуючому контролі у промисловості.

У разі кількісних вимірювань (дозиметрія, визначення активності та розмірів частинок) вимоги до деяких показників технології отримання радіографічного зображення виявляються більш жорсткими, ніж для візуального контролю. Тому слід детально розглянути особливості фосфорної технології, які можуть вплива-

ти на результати кількісних вимірювань.

### **Чутливість і динамічний діапазон**

За цими характеристиками фосфорні пластини, порівняно з рентгенівською плівкою, найбільше виграють.

Для рентгенівської плівки лінійна ділянка, на якій оптична густина негативу пропорційна дозі опромінювання, забезпечує зміну амплітуди сигналу у 100-500 разів (залежно від ти-

пу плівки). Для малих і великих доз опромінювання зміна оптичної густини має нелінійний характер. На противагу цьому фосфорні пластини забезпечують лінійність зміни амплітуди сигналу більш ніж на 6 порядків у дуже широкому діапазоні експозицій. Завдяки цьому можливе отримання якісного зображення навіть у випадках, коли через неадекватність доз (надмірну або недостатню експозицію) потрібна повторна зйомка об'єкту на рентгеновській плівці.

Крім того, мінімальна доза, що викликає появу сигналу, для фосфорних пластин істотно нижча, ніж для рентгеновської плівки. Тобто чутливість пластин у понад 10 разів вища, ніж у рентгеновській плівці.

Ці якості є безперечними перевагами фосфорної технології.

### **Роздільна здатність і мінімальна детектована активність**

Питання про роздільну здатність безпосередньо пов'язане з мінімальною детектованою активністю частинок (МДА), тобто чутливістю методу. У відповідності з результатами роботи [18] під час візуальної обробки радіографічного зображення, отриманого на рентгеновській плівці, плямою почорніння мінімального розміру вважалася така, що є не меншою (30±5) мкм, з оптичною густиною не менше 1,5. Така пляма формується у результаті поглинання деякої дози випромінювання, залежної від активності джерела випромінювання і часу експозиції. Під час експериментальних досліджень було встановлено, що пляма розміром 30 мкм формується радіоактивною частинкою, активність якої визначається за умови ~8,7 Бк·год. Тобто мінімальна активність частинок, яка визначається візуальним шляхом, може становити 2,89 Бк протягом 3 годин експозиції або 0,03 Бк за час експозиції у 336 годин (14 діб).

Просторова роздільна здатність фосфорних пластин визначається розмірами мікрочастин робочого шару пластини. Зменшення параметрів мікрочастин, або, як їх називають, зерен, безумовно, сприяло б якіснішому опрацюванню дрібних деталей зображення. Однак при

цьому доводиться зважати на сильну залежність оптичних властивостей фторброміодиду барію від розміру зерен. Як показують дослідження [14] для зерен, менших за 50 мкм, центри забарвлення стають менш стабільними, процес їх самочинного розпаду прискорюється, і кількість розпадів, що відбуваються безвипромінювальним шляхом, зростає. Ці чинники обмежують розмір зерен, за межами якого знижується чутливість до ядерного опромінення, скорочується час зберігання "прихованого зображення" і зменшується інтенсивність люмінесцентного випромінювання. Тому компромісним рішенням, що дозволяє мати задовільну просторову роздільну здатність і уникнути негативного впливу перерахованих вище ефектів, є використання у робочому шарі пластин зерен розміром 50-100 мкм.

Не дивлячись на те, що мінімальні розміри плями на рентгеновській плівці (30 мкм) і зерен фосфорної пластини (50 мкм) візуально майже не розрізняються, оцінка МДА за умови 8,7 Бк·год навряд чи виправдана, оскільки пластини мають більшу чутливість, ніж рентгеновська плівка.

Крім того, у разі застосування комп'ютерної обробки радіографічного зображення МДА виявляється залежною від критерію ідентифікації, який закладено у програму пошуку плям. Якщо за критерій ідентифікації плями взяти почорніння розміром в 1 піксель, то такий критерій може виявитися "слабким", оскільки він дозволяє ідентифікувати локальні неоднорідності зображення розміром в один-два пікселі як зображення радіоактивних частинок. Якщо ж за критерій ідентифікації плями брати почорніння розміром не менше 2x2 пікселі, то МДА збільшується, але критерій ідентифікації плям виявляється значно надійнішим.

### **Згасання сигналу після експонування**

З часом центри забарвлення, що утворилися під дією ядерного опромінення, можуть самочинно розпадатися. Причиною розпаду є теплові процеси у кристалах люмінофора. Вірогідність процесів розпаду

залежить від температури і збільшується з її зростанням. Це явище негативно впливає на збереження "прихованого зображення" після експонування, оскільки з часом концентрація центрів забарвлення у пластині зменшується.

Для практичних потреб погіршення якості "прихованого зображення" за рахунок зменшення концентрації центрів забарвлення описують як згасання (ослаблення) рівня сигналу, що відбувається при відстроеному зчитуванні зображення. Залежно від типу пластин ослаблення сигналу через дві години після експонування може відбуватися на 30-60% при кімнатній температурі [15].

У випадках, коли цифрова радіографія використовується як візуальний метод контролю, зменшення рівня сигналу не має істотного значення через дуже широкий діапазон чутливості люмінофора пластин і короткий проміжок часу між експонуванням і зчитуванням зображення. Проте у разі кількісних вимірювань (дозиметрія, визначення дисперсного складу частинок) цей ефект може істотно вплинути на кінцеві результати. Так, помітний вплив температурних змін відзначено при вивченні фосфорних пластин у якості дозиметра накопичувального типу [19].

### **Обговорення і висновки.**

Не дивлячись на те, що фосфорна технологія розглядається, насамперед, як сучасна альтернатива рентгеновській плівці при роботі з рентгеновськими джерелами, фізичні явища, що лежать в основі утворення "прихованого зображення", визначають її високу чутливість до будь-яких джерел радіації з енергіями від 10 MeV до 15 MeV. Вже

## ЛІТЕРАТУРА

1. Salbu B., Lind O.C. Radioactive particles released from various nuclear sources // *Radioprotection*. — Suppl. 1. — 2005. — Vol. 40. — P. 27-32.
2. Булгаков Л.А., Калистратова В.С. Радиоактивное излучение и здоровье. — М.: Информ-Атом, 2003. — 165 с.
3. Радиоактивные выпадения от ядерных взрывов / Под ред. Ю.А. Израэля. — М.: Мир, 1968.
4. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. — Л.: Химия, 1980. — 458 с.
5. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. — М.: Наука, 1966. — 552 с.
6. Демчук В.В., Деревец В.И., Мартынюк А.В. Измерительно-вычислительный комплекс для радиографических исследований образцов аэрозолей, почв и донных отложений. Междунар. науч. семинар "Радиоэкология Чернобыльской зоны". Славутич, 18-19 сент. 2002 г.: тез. стендовых докладов. — Славутич, 2002. — С. 15-18.
7. Демчук В.В., Кашпур В.О., Мартынюк О.В. Радиографічні методи контролю неорганізованих викидів з об'єкту "Укриття" // *Довкілля та здоров'я*. — 2006. — № 1 (36). — С. 26-30.
8. Seibert J. Anthony Seibert. Computed Radiography Technology [Електронний ресурс] // Department of Radiology, University of California Davis Medical Center. — 2004. — 23 p. — Режим доступу: <https://www.medicalphysics.org/apps/medicalphysicseidit/Seibert1.pdf>, вільний.
9. Seibert J.A., Boone J.M., Cooper V.N. et al. Cassette-based Digital Mammography [Електронний ресурс] // *Technology in Cancer Research & Treatment*. — 2004. — Vol. 3, № 5. — P. 413-427. — Режим доступу: [www.trct.org/index.cfm?CFID=87749&CFTOKEN=79572141&do=download&p=12475](http://www.trct.org/index.cfm?CFID=87749&CFTOKEN=79572141&do=download&p=12475), вільний.
10. Depriens, E. Computed Radiography in NDT Applications [Електронний ресурс]. — 2004. — 7 p. — Режим доступу: [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/367\\_depriens.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/367_depriens.pdf), вільний.
11. Patel, Ramesh J. Digital Applications of Radiography [Електронний ресурс]. — 2005. — 6 p. — Режим доступу: <http://www.ndt.net/article/mendt2005/htmltxt/08.php3>, вільний.
12. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: в 2 т. Т. 1. Физика атомного ядра. — М.: Атомиздат, 1974. — 584 с.
13. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела: в 2-х т. Т. 2. — М.: Мир, 1979. — 422 с.
14. Schlapp M. Entwicklung hocheffizienter,  $\gamma$ -insensitiver Detektormaterialien und Bildplatten für Neutronen [Електронний ресурс] // *Berichte des Forschungszentrums Jülich / Institut für Festkörperforschung*. — 2003. — 124 s. — ISSN 0944-2952 — Режим доступу: [juwel.fz-juelich.de:8080/dspace122fzj/bitstream/2128/192/1/Juel\\_4076\\_Schlapp.pdf](http://www.juelich.de/8080/dspace122fzj/bitstream/2128/192/1/Juel_4076_Schlapp.pdf), вільний.
15. Гибкие пластины KODAK INDUSTREX Digital Imaging Plates [Электронный ресурс] // Eastman KODAK Company / Публикация KODAK TI-2632. — 2006. — Сентябрь. — 6 с. — Режим доступа: [http://www.kodak.ru/eknep/documents/b9/0900688a805e08b9/RU\\_ti2632.pdf](http://www.kodak.ru/eknep/documents/b9/0900688a805e08b9/RU_ti2632.pdf), свободный.
16. Agfa ADC MD40 Imaging Plate [Електронний ресурс]. — 2 p. — Режим доступу: [www.e-radiography.net/cr/agfa\\_cr\\_plates.pdf](http://www.e-radiography.net/cr/agfa_cr_plates.pdf), вільний.
17. DITABIS Imaging Plate Technology for all Applications in Transmission Electron Microscopy [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [www.ditabis.de/micron.pdf](http://www.ditabis.de/micron.pdf), вільний.
18. Разработка и внедрение метода макрорадиографии для локализации и идентификации радиоактивных частиц в образцах окружающей среды зоны отчуждения ЧАЭС: отчет по НИР (информационный) / НТЦ "РАДИО-ЗОЛЬ"; рук. В.В. Демчук. — К., 1998. — 34 с. — № госрегистрации 0198U003439.
19. Ohuchi H., Yamadera A.V. Application of an Imaging Plate to Radiation Dosimetry [Електронний ресурс] // *CYRIC Annual Report*. — 2001 — P. 165-169. — Режим доступу: [www.cyric.tohoku.ac.jp/english/report/report2001/V10Ohuchi.pdf](http://www.cyric.tohoku.ac.jp/english/report/report2001/V10Ohuchi.pdf), вільний.
20. Gonzalez A.L., Li H., Mitch M. et al. Energy response of an imaging plate exposed to standard beta sources [Електронний ресурс] // *Applied Radiation and Isotopes*. — 2002, Vol. 57. — P. 875-882. — Режим доступу: [www.elsevier.com/locate/apradiso](http://www.elsevier.com/locate/apradiso), вільний.
21. Аппаратно-программный комплекс "CR 35 NDT" [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.unitest-roentgen.ru>, свободный.