

Фізико-математичні науки

УДК 658.14: 658.6

**Кіблик Дмитро Олександрович**

*студент*

*Національного технічного університету України*

*"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

**Киблик Дмитрий Александрович**

*студент*

*Национального технического университета Украины*

*"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"*

**Kiblyk Dmitry**

*Student of the*

*National Technical University of Ukraine*

*"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ РАДІАЦІЇ  
НА HD-КАМЕРІ НА ОСНОВІ МАТРИЦІ CMOS  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
РАДИАЦИИ НА HD-КАМЕРУ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ  
CMOS  
INVESTIGATION OF RADIATION DEGRADATION ON A  
CMOS MATRIX BASED HD-CAMERA**

*Анотація.* У статті досліджуються деградація під впливом іонізаційного випромінювання на HD камері. Всі компоненти випробуваної камери були виготовлені без радіаційного захисту, крім об'єктива. Під час експерименту ми виявили, що випробувана камера показала значну

деградацію після опромінення та відрізнялася від потужності дози. Зі збільшенням потужності дози ці зображення стають яскравішими. Крім того, за допомогою прогресивного аналізу деградації захопленого зображення експериментальні результати показують, що загасання співвідношення сигнал / шум (SNR) у порівнянні з часом випромінювання не є очевидним при тій самій потужності дози, а деградація все більш серйозною з підвищенням потужності дози.

**Ключові слова:** іонізаційне випромінювання датчик зображення CMOS, потужність дози, камера HD.

**Анотація.** В статті досліджуються деградація под впливом іонізації випромінювання на HD камері. Всі компоненти испытанной камери були виготовлені без радіаційної захисту, крім об'єктива. В час експерименту ми виявили, що испытанная камера показала значительную деградацію після облучения и отличалась от мощности дозы. С увеличением мощности дозы эти изображения становятся ярче. Кроме того, с помощью прогрессивного анализа деградации захваченного изображения экспериментальные результаты показывают, что затухание соотношения сигнал / шум (SNR) по сравнению со временем излучения не является очевидным при той же мощности дозы, а деградация все более серьезной с повышением мощности дозы.

**Ключевые слова:** Ионизационных излучения датчик изображения CMOS, мощность дозы, камера HD.

**Summary.** The article deals with degradation under the influence of ionization radiation on an HD camera. All components of the test chamber were made without radiation protection, except for the lens. During the experiment, we found that the tested camera showed significant degradation after irradiation and

*differed from the dose rate. As the dose rate increases, these images become brighter. In addition, with the help of the progressive analysis of the degradation of the captured image, experimental results show that the signal-to-noise ratio (SNR) attenuation compared to the radiation time is not obvious at the same dose rate, and degradation is more and more serious with increasing dose capacity.*

**Key words:** *Ionizing radiation CMOS image sensor, dose rate, HD camera.*

**Постановка проблеми.** Датчики зображення CMOS (CISs) швидко розвивалися в останні роки, скориставшись зменшенням розміру транзисторів. Тепер CIS мають багато переваг, таких як низьке енергоспоживання, широкий динамічний діапазон, низький рівень шуму, висока частота кадрів, висока швидкість передачі даних та просте управління послідовністю синхронізації [1-4]. Зокрема, CISs з радіаційним захистом (RH-CIS) широко використовувались для відеоспостереження під час переривань реакторів атомних станцій та застосувань космічних детекторів на супутниках через їх загальну вищу толерантність до випромінювання порівняно з загальними CISs [5-7]. Тим не менш, загальні CISs мають меншу вартість, більш високу просторову роздільну здатність, більш низький темп струму та більшу надійність, а збиток від ядерної радіації є прийнятним у конкретній середовищі з низькою дозою [8-11]. Аналіз деградації ядерного випромінювання спільної CMOS -камери може стати важливим доказом для проектування та вибору камери, що застосовується в області випромінювання. Тому необхідно проаналізувати деградацію ядерного випромінювання спільної CMOS -камери.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Наразі існує велика кількість наукових праць, які стосуються даної теми. Зокрема, Goiffon представили TID проти пошкоджень DD в CISs, індукційним протонним випромінюванням [12]. Leonello Servoli вивчали прогресивне пошкодження

CIS без радіаційного зміцнення [13]. Чжун Ванг та співавтор повідомляють про деградацію 3T CIS, виготовлених за технологією 0,35 мкм, індукційним TID-опроміненням при 7,2 та 1800,0 Гр (Si) / год і неупереджених умовах [14]. Незважаючи на те, що в кількох статтях досліджується TID-індукційна деградація в CISs, деякі статті зосереджені на впливі потужності дози, на якість зображення HD-камери на основі CIS.

**Формулювання завдання дослідження.** Завдання роботи полягає у підтвердженні деградації продуктивності на HD CMOS-камери з різною потужністю дози. По-перше, деградація зображення спостерігається і фіксується випромінюючими експериментами. Потім, на основі аналізу даних з використанням MATLAB, ми досліджуємо результати деградації та процес випробуваної камери, індуктивним пошкодженням TID, і повідомляється SNR в порівнянні з потужністю дози. Нарешті, запропоновані пропозиції HD CMOS-камери представлені інтуїтивним аналізом вихідних даних камери для користувачів камери в області випромінювання.

**Виклад основного матеріалу.** Промислова камера, що випробовується, в основному складається з об'єктива із збільшеним збільшенням, модуль камери на рівні дошки, блок збору даних та системне програмне забезпечення. Всі частини камери розміщені в звичайній оболонці алюмінієвого сплаву. Об'єктив доступний у модулі камери на основі 2/3 "прогресивного сканування CIS і підтримує C-mount, як показано в Рис. 1. Щоб уникнути впливу об'єктива на випробування, вибрана лінза була високо стійкою до випромінювання. Крім того, він був виготовлений з оптичного скла ZF7, який є радіаційним твердим матеріалом; Тобто, підсвічування або зміна кольору не відбудеться, коли об'єктив піддається впливу випромінювання. Товщина скла становить близько 62 мм, що визначається довжиною лінзи. Радіаційна стійкість лінзи гарантує, що її затухання не є

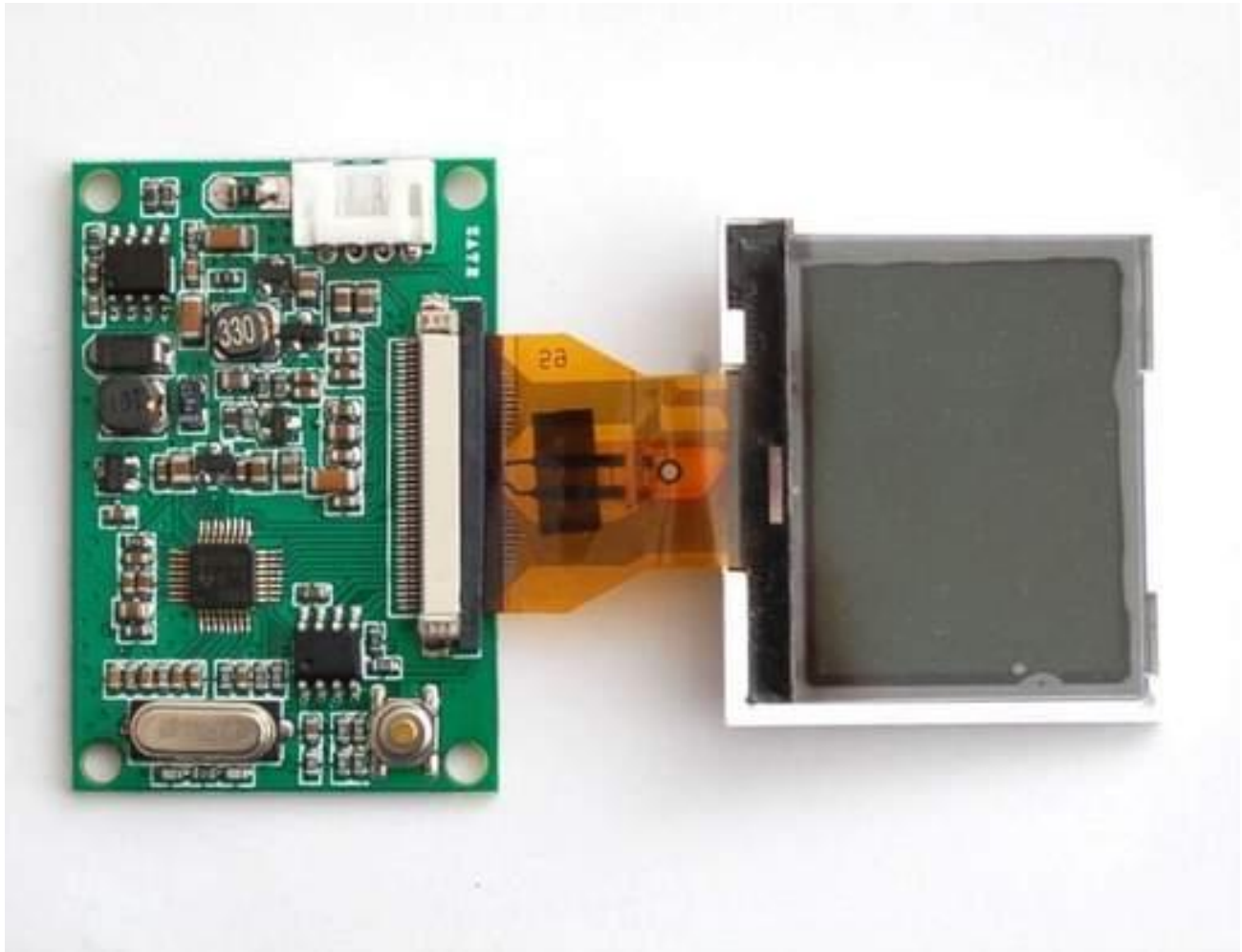
очевидним під час вимірювань, а ефект затухання на експеримент можна ігнорувати.



**Рис. 1. Об'єктив для тесту**

Рис. 2 що модуль камери HD складається в основному з CIS, FPGA контрольного мікросхеми та пристрою зв'язку. CIS є зображенням компонентів камери, і може захоплювати процес деградації камери. У цьому документі вибирається CMV2000, виготовлений за стандартною технологією CIS 0,168 мкм від компанії CMOSIS, завдяки високій чутливості, низькому рівню шуму та високій якості. Масив зображення в CIS складається з  $2048 \times 1088$  пікселів розміром  $5,5 \text{ мкм} \times 5,5 \text{ мкм}$ . Піксель має найсучаснішу архітектуру, яка пропонує корельовані подвійні вибірки (CDS) на основі фронт-кінця фотодіаду 4Т, що значно знижує фіксований шум та темний шум. Піксель контролюється за допомогою глобального затвора з конвеєром

8Т, що дозволяє експозиції під час читання поліпшити частоту кадрів. Чіп та блок зв'язку FPGA також опромінюються гамма-променями. Було доведено, що FPGA на основі Flash на 20% зниження робочої частоти може нормально працювати під час TID 800 Гр. FPGA використовувався для реалізації синхронізації та цифрового читання сигналу датчика зображення.



**Рис. 2. Модуль HD камери під випробуванням**

### **Експериментальні подробиці**

П'ять камер HD опромінюються  $\gamma$ -фотонами, виробленими джерелом гамма-випромінювання Cobalt-60 (у Китайському ізоотопі та радіації корпорації, Ченду, Китай) при кімнатній температурі. Коефіцієнт дози випробувального положення калібрується за допомогою Срібного



діхроматного дозиметра перед випробуванням на опромінення. Камери мають серійні номери від А01 до А05, а всі CISs походять з того ж партії. Камери опромінюють при температурі 1,0, 10,0, 20,0, 50,0 та 100,0 Гр / год протягом 8 годин. Це тому, що камера зі швидкістю 100,0 Гр / год не може вижити після більш ніж 8 годин; Тобто, після цього періоду часу зображення не виводиться. Тести на кожну камеру зайняли таку ж кількість часу. У роботі представлені умови експерименту випромінювання та серійний номер тестованих камер Табл. 1. Всі камери постачаються з 12 В постійного струму та можуть виводити відеосигнал у реальному часі.

*Таблиця 1*

**Умови випробувань випромінювання та серійні номери випробуваних камер**

<b>Номер камери</b>	<b>Стан смуги</b>	<b>Швидкість дози (Г / год)</b>	<b>Загальна доза (Gy)</b>
A01	Упередженість	1.0	8.0
A02	Упередженість	10.0	80,0
A03	Упередженість	20.0	160.0
A04	Упередженість	50,0	400.0
A05	Упередженість	100,0	800.0

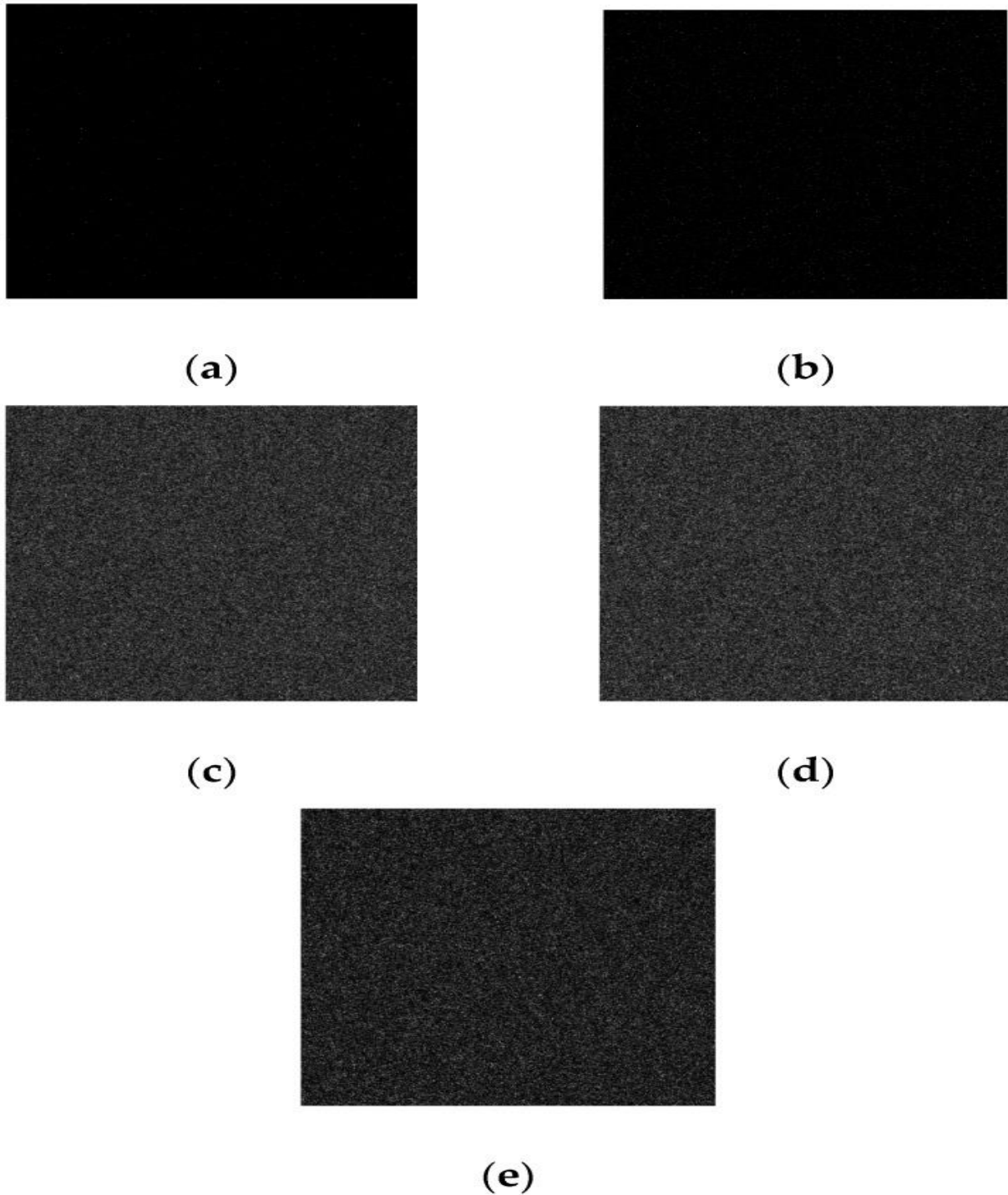
Метод випробувань, використаний у цьому документі, полягає в наступному: по-перше, у всьому спрямовує джерело світла, щоб забезпечити достатню кількість світла поля для тестування. Перемикач джерела світла можна регулювати для вимірювання темряви датчика. Потім дані п'яти камер постійно записуються у відеопотік під час прогресивного руйнування, відповідно. Для порівняння SNR камер до, під час та після випромінювання, відеопотік включає зображення в трьох умовах. Нарешті, рівень деградації

фотокамери розраховується як стандарт Європейської асоціації візуалізаторів машин (EMVA) 1288.

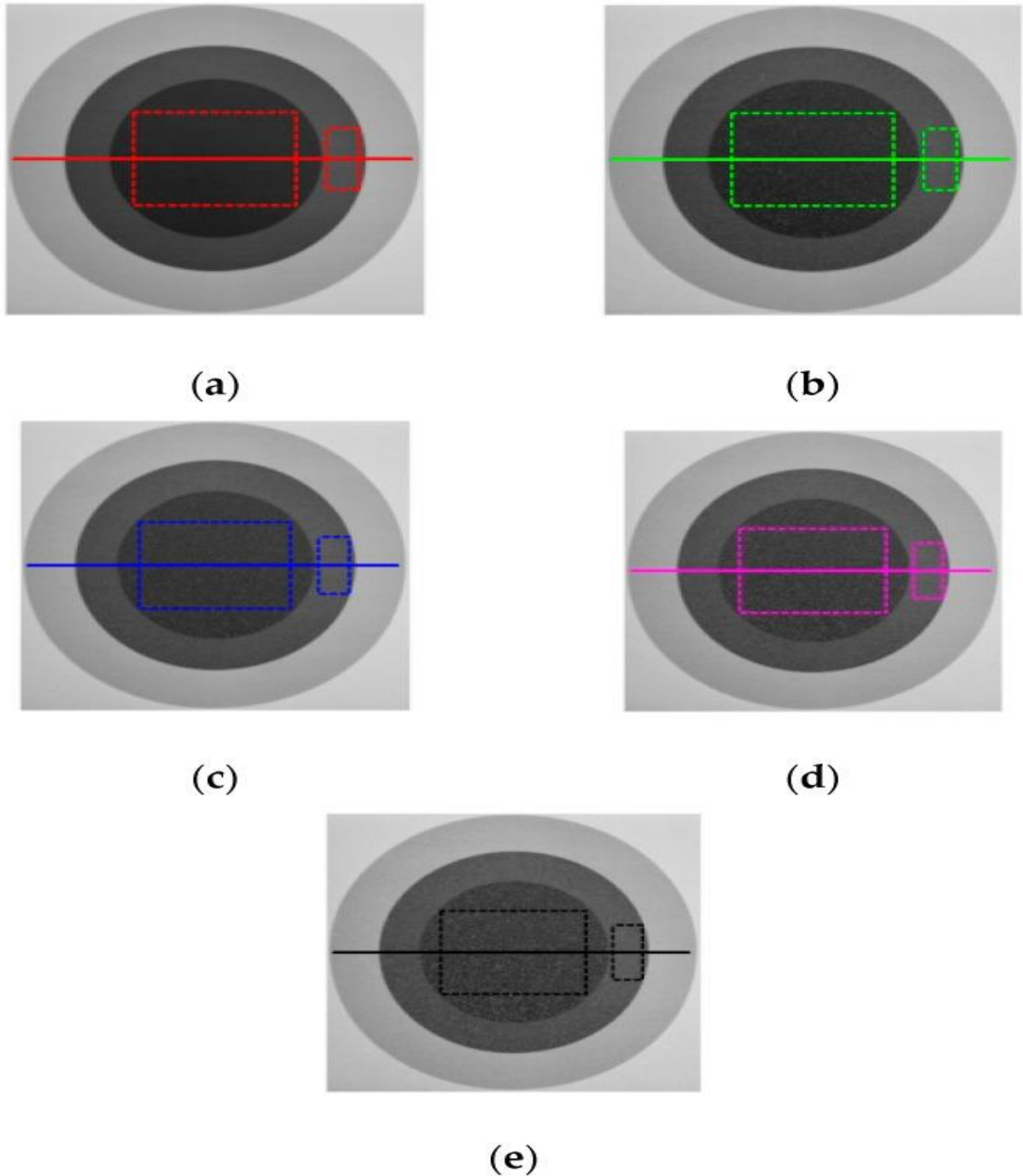
### **Аналіз даних**

Коефіцієнт дози є постійним значенням для кожної камери в межах певного просторового діапазону під час випробування на опромінення. Щоб уникнути впливу ТІД на аналіз потужності дози, перед випробуванням на опромінення джерело світла вимикається. На початку тесту на опромінення всі онлайн-кадри фіксуються за п'ятьма різними потужними дозами для вимірювання гармошок одночасно, відповідно. Відповідні зображення можна побачити в а-е. Потім джерело світла негайно вмикається. Зображення також схоплені за п'ятьма різними значеннями дози, відповідно. У полі перегляду камери розташовані відносно яскраві та темні області з однорідним фоном. Схоплені зображення можна побачити в Рис. 4 а-е.





**Рис. 3. Знімки, отримані без джерела світла, за умови п'яти доз, відповідно**  
(а) Зображення придбано при 1,0 Гр / год. (б) Зображення придбано при 10.0  
Грн / год. (в) зображення отримане при 20,0 Гр / год. (г) зображення  
отримане при 50,0Гр / год. (е) зображення отримане при 100,0 Гр / год.



**Рис. 4.** Зображення, придбані джерелом світла, за умови п'яти доз, відповідно  
(а) Зображення придбано при 1,0 Гр / год. (б) Зображення придбано при 10,0  
Грн / год. (в) зображення отримане при 20,0 Гр / год. (г) зображення  
отримане при 50,0 Гр / год. (е) зображення отримане при 100,0 Гр / год.

Один темний диск та дві відносно яскраві кільця відповідають об'єкту пікселя у полі перегляду, а білі крапки - це протони, виявлені камерою. Для того, щоб інтуїтивно оцінити вплив радіації на об'єкт при різних потужності дози, горизонтальний поперечний рівень значень пікселів в Рис. 4 а-е обчислено. Відповідне порівняння горизонтального перерізу значень пікселів показано в Рис. 5 а-d, відповідно. Один з помітних ефектів від ядерного радіаційного ураження є те, що чим яскравіше піксель, тим менше ефект випромінювання при однаковій потужності дози, і навпаки. Результати також показують, що при збільшенні потужності дози загальні сірі значення зображення зростають; а саме, ці ж зображення стають яскравішими.

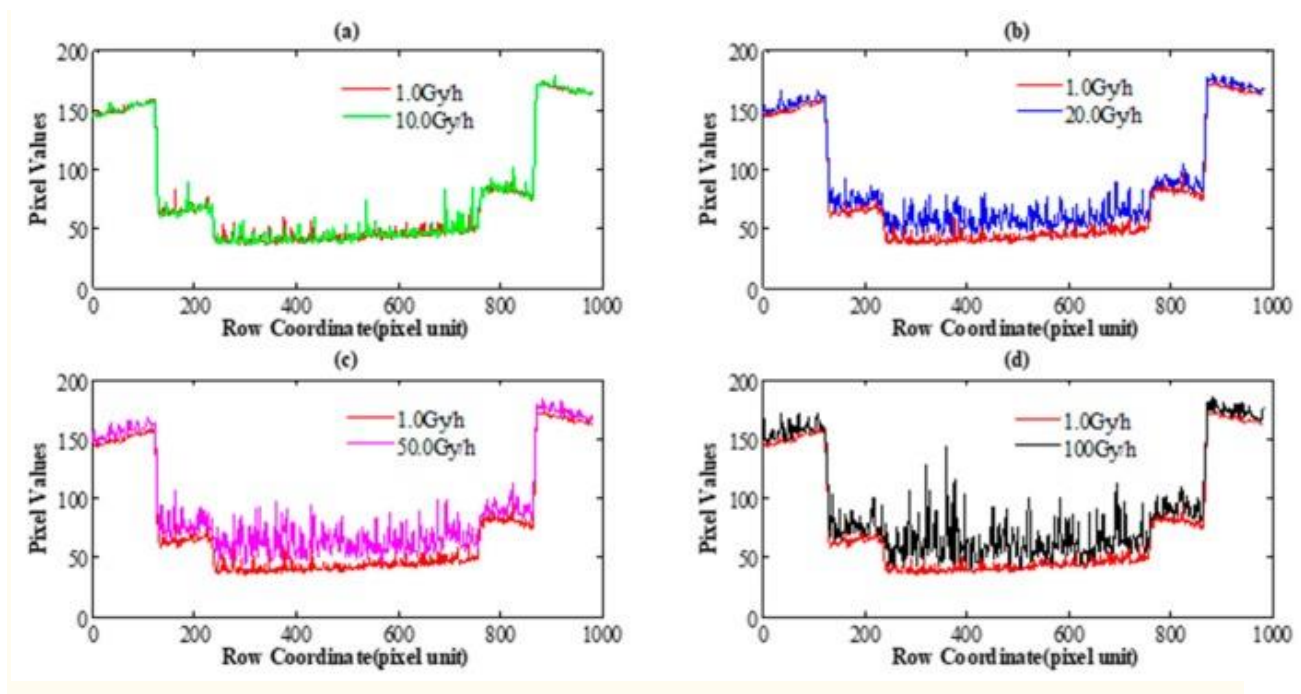
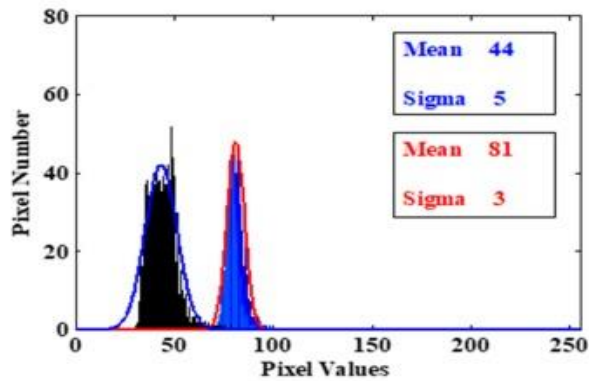


Рис. 5

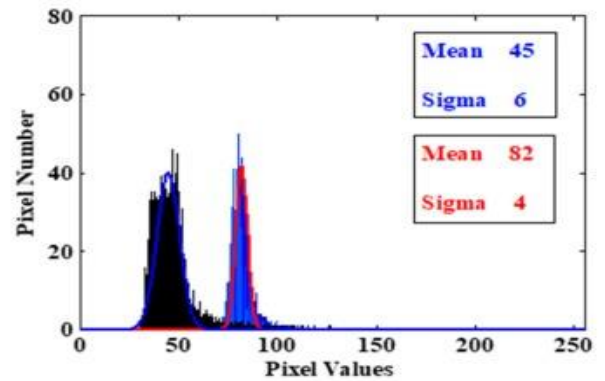
(а) Порівняння горизонтального перерізу в Рис. 4а (червона солідна лінія) і Рис. 4 б (зелена суцільна лінія). (б) Порівняння горизонтального перерізу в Рис. 4а (червона солідна лінія) і Рис. 4 с (синя тверда лінія). (в) Порівняння горизонтального перерізу в Рис. 4а (червона солідна лінія) і Рис. 4 d (рожева суцільна лінія). (г)

Порівняння горизонтального поперечного перерізу в Рис. 4а (червона солідна лінія) і Рис. 4 е (чорна суцільна лінія).

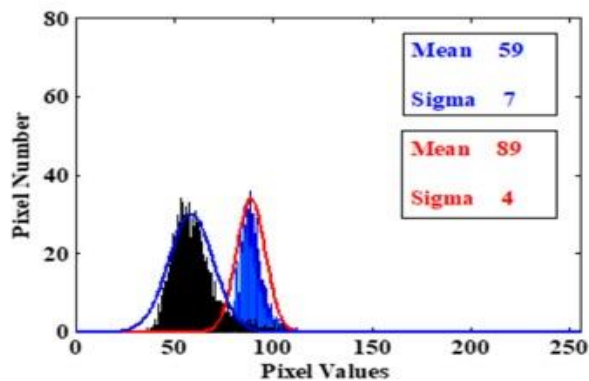
Щоб детально вивчити такий ефект, ми використовуємо гістограми зображень для аналізу розподілу шумів. Велика прямокутна коробка відповідає темній області, а маленька відповідає світлій області Рис. 4 а-е. Використовуючи гістограму зображення, результати аналізу з п'ятьма різними значеннями дози показані в Рис. 6, відповідно. Згідно з На рисунку 6 ми можемо зробити наступні висновки: при однаковій потужності дози в порівнянні з темною областю ефект випромінювання в яскравій області нижчий, а відповідна дисперсія менша. Під дією різних рівнів дози, чим більше потужність дози, тим гірша ефект випромінювання в яскравому та темному областях, а відповідні дисперсії стають більшими. Варто зазначити, що з збільшенням потужності дози, середні значення цих двох ділянок також стають більшими, відповідно. Це вказує на те, що зображення стають яскравішими. Це явище добре узгоджується з результатами аналізу в Росії Рис. 5. Це означає, що динамічний діапазон зображення зменшується, а саме, динамічні характеристики системи йдуть погано. Результати також показують, що чим вище потужність дози, тим більше дисперсія шуму знаходиться в області випромінювання, а саме, якість зображення зменшується із збільшенням радіаційного шуму. Це явище добре узгоджується з візуальним спостереженням в Росії Рис. 4.



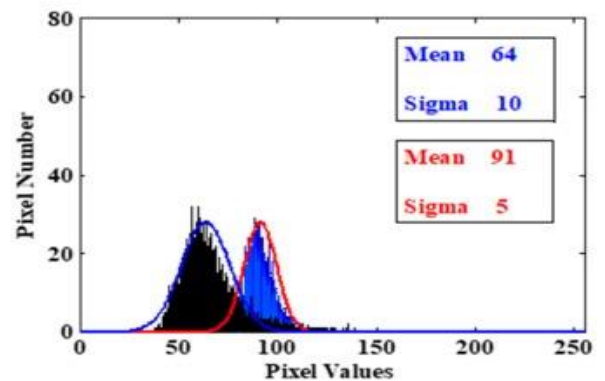
(a)



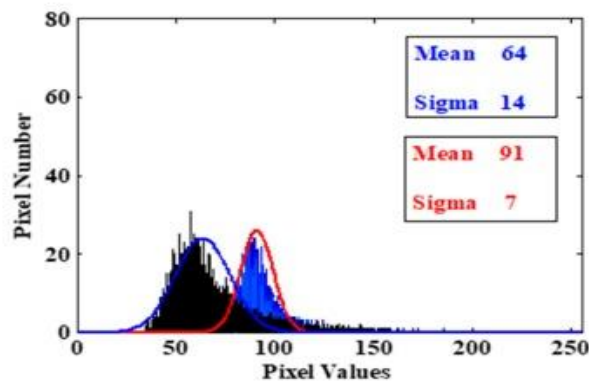
(b)



(c)



(d)



(e)

Рис. 6 (а) Порівняння гістограми темних і яскравих областей прямокутника в Рис. 4 а. (б) Порівняння гістограми темних і яскравих областей прямокутника в Рис. 4 б. (в) порівняння гістограми темних і яскравих областей прямокутників в Рис. 4 с. (г) порівняння гістограми темних і яскравих областей прямокутника в Малюнок 4 d. (е) Порівняння гістограми темних і яскравих областей прямокутника в Рис. 4 е.

## Неперервний аналіз деградації

Безперервне отримання даних під час процедури опромінення було використано для запису прогресивного зносу камери в робочих умовах. SNR означає якість вихідного сигналу в камері на базі CISs. Як змішана сигнальна схема, SNR є ключовим параметром камери. SNR може бути вказано як:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left( \frac{V_{\text{Sig}}}{V_{\text{N}}} \right) \quad (1)$$

де  $V_{\text{Sig}}$  означає вихідний сигнал,  $V_{\text{N}}$  означає весь шум на заданому рівні сигналу.

Згідно з стандартом EMVA1288, по-перше, ми визначаємо середнє сіре значення яскраво-темної ділянки прямокутника у знімному зображенні відповідно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{y,\text{bright}} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} y_{\text{bright}} [m] [n] \\ \mu_{y,\text{dark}} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} y_{\text{dark}} [m] [n] \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $M$  і  $N$  є кількість рядків і стовпців, відповідно, яскравою прямокутної область  $y_{\text{bright}}$  і темна область прямокутника  $y_{\text{dark}}$ .  $m$  та  $n$  - індекси рядка та стовпця масиву, відповідно.

Тоді SNR яскравої та темної області прямокутника задаються як [ 15 ]:



$$\begin{cases} \text{SNR}_{\text{bright}} = 20 \lg \left( \frac{\mu_{y,\text{bright}} - \mu_{y,D}}{\sigma_{y,\text{bright}}} \right) \\ \text{SNR}_{\text{dark}} = 20 \lg \left( \frac{\mu_{y,\text{dark}} - \mu_{y,D}}{\sigma_{y,\text{dark}}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

де  $\mu_{y,D}$  середнє сіре значення у зображеному відповідному зображенні без джерела світла,  $\sigma_{y,\text{bright}}$  і  $\sigma_{y,\text{dark}}$  є стандартним відхиленням сірого значення яскраво-темної області прямокутника, відповідно.

Оскільки SNR пов'язаний із ступенем насичення датчиків, ми виміряли  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  при цьому час інтеграції (20 мс) та однакова інтенсивність світла в цьому документі.  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  при різних рівнях дози можна побачити в Рис. 7. Згідно з На рисунку 7 можна зробити висновок, що ослаблення обох  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  не є очевидними при збільшенні часу випромінювання за умови однакової потужності дози протягом 8 годин вимірювань. Між тим,  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  набагато краще, ніж  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  при однаковій потужності дози. Це явище добре узгоджується з результатами аналізу в Росії Рис. 6. І зменшення  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  залежить від потужності дози, як показано в Рис. 7.  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  зниження при 20,0, 50,0 і 100,0 Гр / год набагато більше, ніж на рівні 1,0 і 10,0 Гр / год. Варто відзначити, що зменшення  $\text{SNR}_{\text{bright}}$  і  $\text{SNR}_{\text{dark}}$  при 10.0 Gy / h все ще легкі, і їх ослаблення становить не більше 5 дБ. Він вище 40 дБ, що відповідає потребам загального моніторингу за якістю зображення.

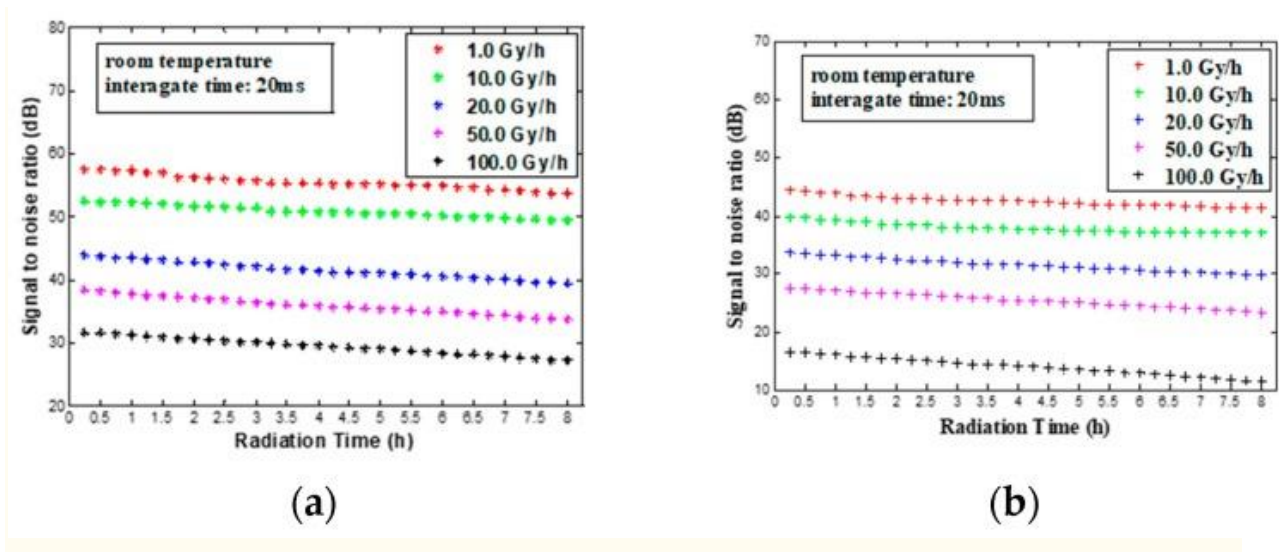


Рис. 7

(a) SNR<sub>bright</sub> в порівнянні з часом випромінювання при різних ступенях дози. (b) SNR<sub>dark</sub> в порівнянні з часом випромінювання при різних ступенях дози

Варто відзначити, що зменшення обидвох SNR<sub>bright</sub> і SNR<sub>dark</sub> залежить від частоти дозування в наших вимірах. Це відрізняється від результатів в умовах об'єктивності в посиланнях [14]. Цілком можливо, що пар електронно-дірчастих фотодіодів, зроблених випромінюванням, складніше піддаватися при дії електричного поля, створеного упередженим станом. Отже, сенсори набагато чутливі до потужності дози та ТІД при упередженому стані.

**Висновки.** У цій роботі ми досліджували деградацію ядерного випромінювання на HD CMOS-камери в умовах упередження на рівні 1,0, 10,0, 20,0, 50,0 та 100,0 Гр / год при кімнатній температурі. Основний модуль HD CMOS-камери - це CISs, виготовлений з використанням стандартної технології CMOS з частотою 0,18  $\mu\text{m}$  з чотирьох-транзисторною піксельною архітектурою PPD без радіаційного зміцнення. Камера постійно отримувала дані під час опромінення, дозволяючи вимірювати пошкоджуючі ефекти в

робочих умовах. Поведінка випробуваних камер показує помітне погіршення після опромінення і відрізняється від потужності дози.

Під час опромінення один видимий ефект камери, випромінюваний променями  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  полягає в тому, що чим яскравіше піксель, тим менше ефект випромінювання при однаковій потужності дози. Чим вище потужність дози, тим більша роздільна здатність шуму зони випромінювання знаходиться на початку випробування на опромінення. Проте аналіз деградації радіації не є достатньо комплексним. Тест не робить різниці між TID і внесенням потужності дози до ефекту радіації. Фактично, TID може бути основною причиною зміни шуму, що виникає в області випромінювання. У майбутньому, для підтвердження висновку потрібно буде провести більш радіаційні експерименти одного і того ж TID.

Аналізуючи SNR зображення, ми отримаємо, що загасання SNR не є очевидним з часом збільшення випромінювання, а зниження SNR залежить від потужності дози. Незважаючи на це, зниження SNR на 10,0 Г / год залишається м'яким, а його загасання становить 5 дБ. Отже, індустріальна камера HD, заснована на спільних країнах CISs, може бути доцільною для деяких застосувань, де задіяні іонізуючі випромінювання з помірним радіаційним ураженням.

### **Література**

1. Nie K., Yin Z., Xu J. A fast correlated multiple sampling technique based on 12-bit SAR ADC with digital calibration for low-noise CMOS image sensor. *Microelectron. J.* 2017;59:47–54. doi: 10.1016/j.mejo.2016.11.010.
2. Liu Y., Xing D., Wang Y., Chen J. A low power dissipation high-speed CMOS image sensor with column-parallel sigma-delta ADCs. *Microelectron. J.* 2015;46:860–868. doi: 10.1016/j.mejo.2015.06.021.

3. Kawahito S., Seo M. Noise Reduction Effect of Multiple-Sampling-Based Signal-Readout Circuits for Ultra-Low Noise CMOS Image Sensors. *Sensors*. 2016;16:1867 doi: 10.3390/s16111867.
4. Yu C., Nie K., Xu J., Gao J. A Low Power Digital Accumulation Technique for Digital-Domain CMOS TDI Image Sensor. *Sensors*. 2016;16:1572 doi: 10.3390/s16101572.
5. Snoeys W., Rinella G., Hillemanns H., Kugathasan T., Mager M., Musa L., Riedler P., Reidt F., Hoorne J., Fenigstein A., Leitner T. A process modification for CMOS monolithic active pixel sensors for enhanced depletion, timing performance and radiation tolerance. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2017;871:90–96. doi: 10.1016/j.nima.2017.07.046.
6. Mamdy B., Lu G., Roy F. P-type BSI Image Sensor with Active Deep Trench Interface Passivation for Radiation-hardened Imaging Systems. *Procedia Eng.* 2016;168:176–180. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.211.
7. Yang X., Wang Y., Du B., Yu C. Total dose radiation effects of hybrid bulk/SOI CMOS active pixel with buried channel SOI source follower. *Microelectron. J.* 2014;45:477–481. doi: 10.1016/j.mejo.2014.02.021.
8. Michail C., Valais I., Seferis I., Kalyvas N., Fountos G., Kandarakis I. Experimental measurement of a high resolution CMOS detector coupled to CsI scintillators under X-ray radiation. *Radiat. Meas.* 2015;74:39–46. doi: 10.1016/j.radmeas.2015.02.007.
9. Pérez M., Lipovetzky J., Haro M., Sidelnik I., Blostein J., Bessia F., Berisso M. Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2016;827:171–180. doi: 10.1016/j.nima.2016.04.072.

10. Uher J., Holy T., Jakubek J., Lehmann E., Pospisil S., Vacik J. Performance of a pixel detector suited for slow neutrons. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2005;542:283–287. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.149.
11. Lee C., Huang H., Yeh H. The Development of Sun-Tracking System Using Image Processing. *Sensors.* 2013;13:5448–5459. doi: 10.3390/s130505448.
12. Goiffon V., Magnan P., Saint-Pé O., Bernard F., Rolland G. Ionization versus displacement damage effects in proton irradiated CMOS sensors manufactured in deep submicron process. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2009;610:225–229. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.078.
13. Servoli L., Bizzarri F., Passeri D. Continuous measurement of radiation damage of standard CMOS imagers. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2011;658:137–140. doi: 10.1016/j.nima.2011.04.059
14. Wang Z., Ma Y., Liu J., Xue Y., He B., Yao Z., Huang S., Liu M., Sheng J. Degradation and annealing studies on gamma rays irradiated COTS PPD CISs at different dose rates. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2016;820:89–94. doi: 10.1016/j.nima.2016.03.006.
15. European Machine Vision Association (EMVA) EMVA 1288. [(accessed on 1 December 2017)].