

Сергій Дмитрович Крячок

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: geodesist2015@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>ResearcherID: [N-3061-2016](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501). SCOPUS Author ID: [57204332476](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501)**ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ ВИКОНАННЯ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ**

Огляд існуючих систем візуалізації радіаційного випромінювання показав, що системи комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами спроможні працювати у віддаленому радіаційному полі та мають невелику вагу, а тому найбільш придатні для застосування на платформах БПЛА. У результаті аналізу встановлено, що наразі системи комптонівської візуалізації ефективні лише для виявлення джерел радіаційного випромінювання в тісному міському середовищі та приміщеннях, а системи з рухливими детекторами дозволяють виконувати гамма-моніторинг повному обсязі.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; радіаційний моніторинг; системи візуалізації; дистанційне зондування Землі.

Рис.: 12. Табл.: 1. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. За останні десятиліття розвиток цифрових та інформаційних технологій, елементної бази стали поштовхом для створення засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), у тому числі з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що значно розширило горизонти застосування геодезичної науки для забезпечення геопросторовою інформацією різних галузей економіки, науки, військової сфери, а також для розв'язання різноманітних інженерних задач і прийняття управлінських рішень [1].

Наразі відбувається активізація існуючих та поява нових терористичних режимів. Це може спровокувати використання ними засобів масового ураження включно з ядерними зарядами. Потенційними цілями для нападу є атомні електростанції, об'єкти інфраструктур, центри прийняття рішень. Крім того, у спеціалізованих лабораторіях та наукових центрах використовуються ядерні реактори малої потужності, які в результаті аварії можуть спричинити викиди радіоактивних речовин. Розвиток ядерних технологій веде до поширення джерел радіоактивного випромінювання.

Тому актуальним є розробка засобів ДЗЗ для моніторингу радіоактивного випромінювання на платформах БПЛА, які націлені на пошук джерел радіоактивного випромінювання, картографування природного підвищеного радіаційного фону або забруднених радіонуклідами територій [2].

Елементна база БПЛА постійно удосконалюються [3]. Завдяки невеликій швидкості та малій висоті польоту БПЛА забезпечується висока роздільна здатність пошуку та картографування радіаційного поля, а конструкції, приладове наповнення та експлуатація мають значно меншу вартість в порівнянні з літаками та гелікоптерами і дозволяють убезпечити операторів від дії радіаційного випромінювання в порівнянні з наземними методами [4]. Стаття є оглядово-аналітичною.

Постановка проблеми. Такі різновиди радіації як рентгенівське і гамма-випромінювання від часу їх відкриття широко застосовуються в науці, техніці, промисловості, медицині. Практичне застосування цих випромінювань пов'язане з їх проникною здатністю. Ця властивість дозволяє спостерігати та досліджувати внутрішні структури оптично непрозорих об'єктів та процесів, є маркерами для виявлення джерел радіоактивного випромінювання, однак є небезпечною для здоров'я та життя людини.

Застосування методів досліджень, діагностики та виявлення стає ефективним з розвитком методів візуалізації радіаційного випромінювання. Візуалізація включає в себе детектування та комп'ютерну обробку лічильної і спектральної інформації про радіаційне випромінювання з метою отримання його оптичного уявлення, вивчення структури джерела випромінювання та локалізації його місцеположення [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У системах візуалізації використовуються різноманітні детектори виявлення радіаційного випромінювання. Їхня дія ґрунтується на тому, що потрапляння високо енергетичної ядерної частинки в матеріальне середовище, веде до його іонізації. Детектори мають свої різновиди за способом фіксації іонізованих потоків. Так, у детекторі Гейгера-Мюллера за високої напруги від 500 В до 800 В між анодом і катодом та наявності в середині балона інертного газу, індукується явище газового підсилення, яке прискорює вільні електрони від початкової іонізації до появи неконтрольованої ланцюгової лавини по всьому об'єму газу, генеруючи електричний імпульс або відлік. Цей процес триває від 200 до 400 мкс, протягом якого детектор вважається «мертвим» і нездатним виявляти нові ядерні частинки, перш ніж він зможе знову почати рахувати імпульси. Для зменшення «мертвого» часу, наприклад, додають всередину газової трубки 10 % етанолу. Детектор фіксує інтенсивність випромінювання за частотою відліків [6; 7].

У сцинтиляційному детекторі використовується властивість матеріального середовища поглинати енергію від зарядженої частки, яка призводить до випромінювання світла – сцинтиляції. Для цього використовуються неорганічні кристалічні сцинтилятори, такі як йодид натрію (NaI), сульфід цинку (ZnS) та інші. Ультрафіолетове світло, що утворюється в сцинтиляторі, фокусується на фотокатоді, викликаючи фотоэффект, який посилюється, наприклад, фотопомножувачем. Сигнал від сцинтиляційного детектора пропорційний енергії зареєстрованого гамма-фотона, а частота відліків, яка відповідає частоті спалахів світла, фіксує інтенсивність випромінювання [6; 7].

У напівпровідниковому детекторі падаюче випромінювання призводить до появи електронно-діркових пар у напівпровіднику, завдяки чому формується сигнал детектування. Ці детектори можуть працювати при низькій напрузі, мають низьке енергоспоживання, менш чутливі до електромагнітних полів і значно менші за розміром та через значну щільність твердого тіла можуть забезпечити більше інформації стосовно падаючого випромінювання в порівнянні з іншими типами детекторів [6; 7].

Характеристиками систем візуалізації радіаційного випромінювання є поле зору, просторова роздільна здатність, енергетична роздільна здатність. Кут поля зору є тілесний кут, у середині якого відбувається збір радіаційного випромінювання детектором. Просторова роздільна здатність визначає деталізацію об'єкта зображення. Енергетична роздільна здатність визначає, наскільки добре окремі гамма-лінії в енергетичному спектрі випромінювання можна відрізнити від інших ліній і фону [8].

Існуючі системи візуалізації гамма-поля поділяють на наступні групи: системи із колімованими детекторами; системи із кодовою апертурою; системи із обертовою модуляцією; системи комптонівської візуалізації; системи з рухливими детекторами (спрямовані системи) [5; 8].

Системи візуалізації із колімованими детекторами використовують позиційно-чутливі детектори – матриці чи масиви із окремих детекторів випромінювання або неперервні кристали сцинтиляторів із системою реєстрації положення спалахів від взаємодії гамма-квантів з речовиною сцинтилятора. Наприклад, камера Анжера містить важкий поглинач, виготовлений зі свинцевих або вольфрамівих сплавів з багатьма отворами. Отвори можуть мати різну форму, від круглої до шестигранної. Поглинач розміщується перед чутливим до положення детектором гамма-випромінювання (рис. 1). [8].

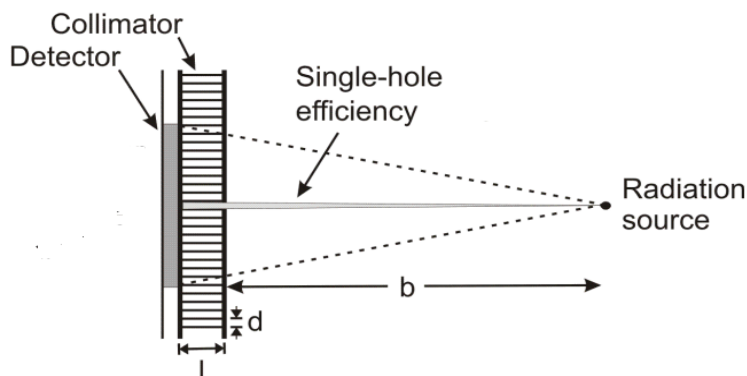


Рис. 1. Камера Анжера: коліматор з детектором та системою паралельних отворів довжиною l та діаметром d , який розміщено на відстані b від джерела радіаційного та у ближньому полі має ефективність одного отвору [8]

У ближньому полі, поширеному в ядерній медицині, гамма-промені від об'єктів можна побачити лише через кілька отворів, більшість падаючих гамма-променів блокується передньою поверхнею коліматора. Отже, просторова роздільна здатність визначається практично ефективністю одного отвору. Перегородки втрачають своє призначення, якщо джерело випромінювання віддаляється від них на відстань, більшу за 10 м. Тоді падаючі гамма-промені можна розглядати як паралельні. Це означає, що жодна структура об'єкта не може бути розрізнена в межах поля зору коліматора. У цьому випадку така система перетворюється в трубку-коліматор, та забезпечує можливість отримання зображень лише шляхом переміщення системи вздовж об'єкта дослідження [8].

Для підвищення ефективності та збільшення поля зору були розроблені коліматори, у вигляді системи отворів, поширених по площин – системи з кодовою апертурою. Системи з кодовою апертурою унікально модулюють кожен позицію в полі зору на чутливий до положення детектор гамма-випромінювання. Отримане зображення необхідно декодувати, використовуючи цифровий або оптичний методи. Застосовуються для отримання рентгенівських зображень. На рис. 2 показано схему системи з кодовою апертурою у вигляді гамма-сканера. Ефективність зображення обмежена в умовах високої активності і складного гамма-фону. Система з кодовою апертурою може лише зменшити інтенсивність фону відносно сигналу, але не може їх повністю розрізнити, особливо для візуалізації протяжних об'єктів. У дальньому радіаційному полі кодована апертура еквівалентна простій точковій системі [8].

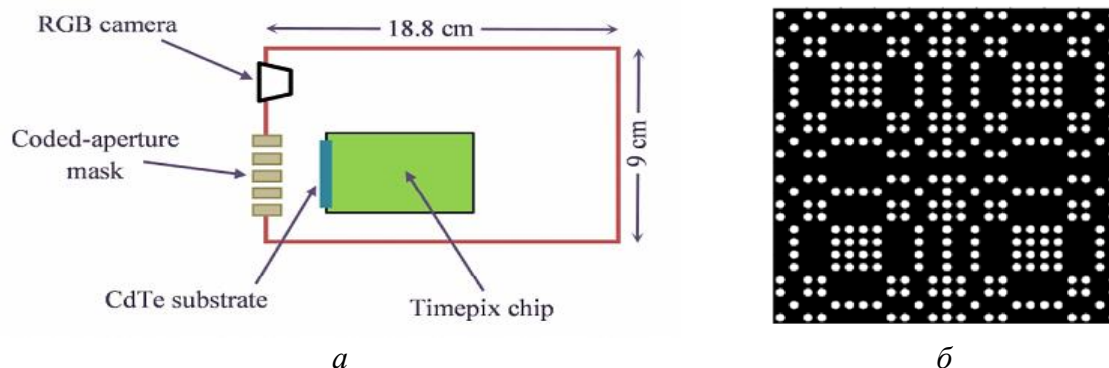


Рис. 2. Гамма-сканер:

а – оптична камера, маска з кодовою апертурою, детектор CdTe (на телуридї кадмію), чіп Тітерікс для виявлення радіоактивних фотонів [9];

б – вигляд маски з кодовою апертурою, виготовленої з вольфраму [10]

Системи з кодовою модуляцією можуть використовувати принцип «маска-антимаска» (рис. 3, а). Для реалізації такої системи необхідно мати маску, складену з кількох періодів рівномірно-надлишкового масиву, розташування кожного з детекторів навпроти одиничного елемента маски та можливості перетворення маски в антимаску завдяки обертанням її на 180° . Це дозволяє компенсувати нерівномірність фонового опромінення детекторів. Система може працювати з джерелами гамма-випромінювання, розташованими на значних відстанях - за паралельних променів [8].

Система із обертовою модуляцією (обертально-модуляційний коліматор) може складатися з двох наборів паралельних решіток з екрануючого матеріалу (рис. 3, б). Обидві решітки обертаються разом перед детектором, модулюючи випромінювання, що на нього потрапляє. Таким чином, рівень випромінювання залежить від куту надходження сигналу у систему та від поточного кута повороту решіток і може бути відтворений за допомогою відповідного алгоритму. Системі не потрібен чутливий до положення детектор гамма-випромінювання. За дальнього поля випромінювання системи із обертовою модуляцією втрачають свою ефективність [5; 8].

Концепція комптонівської візуалізації спирається на процес комптонівського розсіювання і зв'язок між кутом розсіювання θ та енергією падаючого гамма-випромінювання (рис. 4, а).

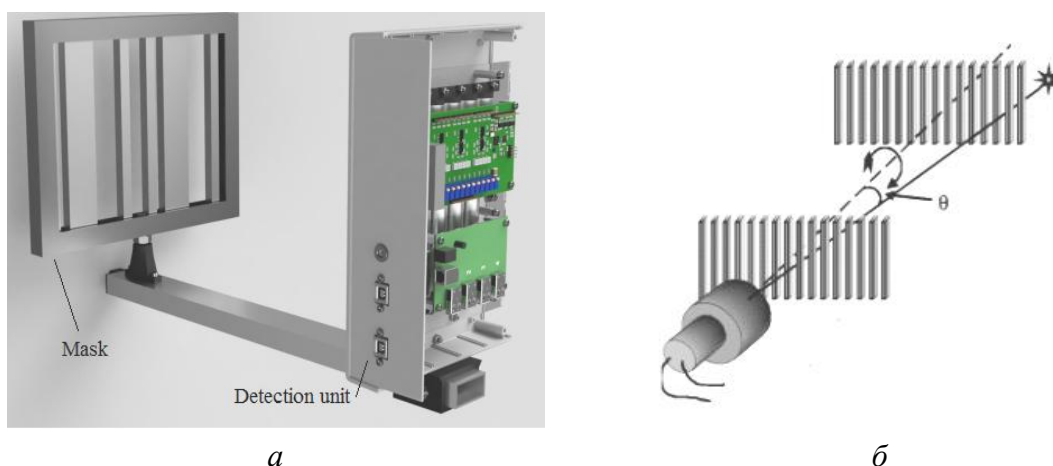


Рис. 3. Системи, що потребують обертання масок:

а – система «маска-антимаска» [11]; б – система із обертовою модуляцією [8]

Система комптонівської візуалізації, на відміну від звичайних і коліматорних систем візуалізації, вимагає, щоб падаюче гамма-випромінювання взаємодіяло принаймні двічі в детекторі: одне комптонівське розсіювання і одне фотоелектричне поглинання. Положення перших двох взаємодій визначають вісь симетрії конуса, кут відкриття якого θ визначається енергією першої взаємодії та повною енергією гамма-випромінювання (рис. 4, а). Проекції конусів від кількох взаємодій на сферу будуть перекриватися в місці розташування джерела (рис. 4, б), що дозволяє визначати його положення в трьох вимірах [8].

Комптонівські системи візуалізації є єдиними, які здатні розрізнити фон і джерело випромінювання тому, що можуть вимірювати і те і інше, одночасно. Досягнення у двовимірній сегментації напівпровідникових детекторів та обробці сигналів дозволяють створити ефективні системи комптонівської візуалізації з високою роздільною здатністю. Ця система здатна працювати в дальньому радіаційному полі [8].

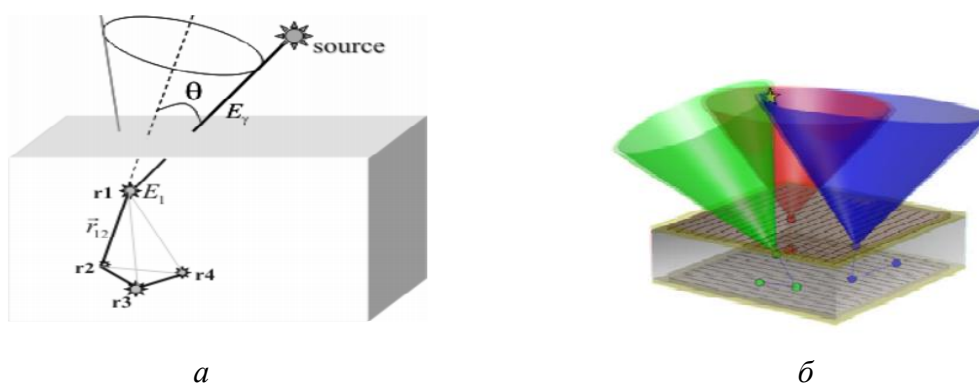


Рис. 4. Ілюстрація принципу комптонівської візуалізації:
 а – зв'язок між кутом розсіювання θ та енергією падаючого гамма-випромінювання;
 б – перетин конусів розсіювання, який фіксує місцеположення джерела випромінювання [8]

Системи з рухливими детекторами – це досить прості пристрої, які складаються з нечутливих до положення детекторів. Вони дозволяють визначати місцезнаходження джерел за умови, що система виявлення наближається до джерела. Це наближення виконується шляхом визначення інтенсивності гамма-випромінювання за швидкістю підрахунку в детекторі як функції часу переміщення і/або місця розташування. Системи з рухливими детекторами можуть мати спрямовані або всепрямовані детектори. Кут поля зору β відповідає значенню просторової роздільної здатності. Спрямовані детектори можуть мати екранування (рис. 5, а).

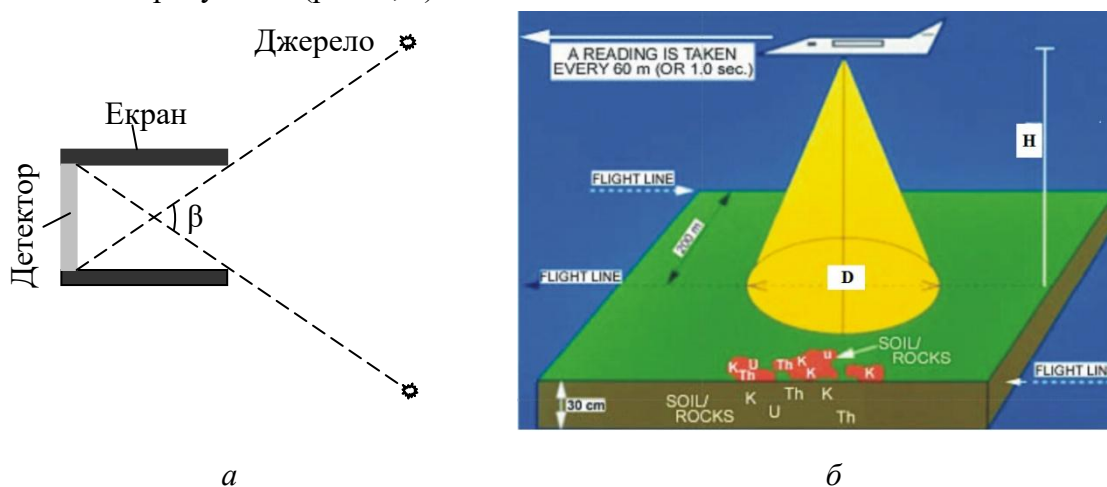


Рис. 5. До системи з рухливим детектором:
 а – кут поля зору спрямованого детектора β (розроблено автором);
 б – система візуалізації з рухливим детектором повітряного базування [8]

Екранування створює тінь, яка дозволяє більш точно і надійно визначення місцезнаходження джерела, ніж це можливо з неекранованим детектором. Такий спрямований детектор має, як правило, вигляд трубки-коліматора. Кут поля зору за висоти H визначає поле зору - діаметр D території на земній поверхні, від якої радіаційне випромінювання надходить до детектора (рис. 5, б). Ці системи здатні працювати у дальньому радіаційному полі [5; 8].

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Зведена інформація стосовно основних технічних параметрів систем візуалізації наведена в таблиці.

Таблиця – Зведена інформація основних технічних параметрів систем візуалізації [8]

Параметри	Коліматор	Кодова апертура	Обертова модуляція	Комптона візуалізація	Рухливий детектор
Кут поля зору	< 60°	< 60°	< 60°	180° чи 360°	30° - 360°
Просторова роздільна здатність	< 30°	< 5°	< 5°	1° - 5°	≥ 30°
Енергетична роздільна здатність	Погана – відмінна	Погана – відмінно	Погана – відмінна	Добра – відмінна	Погана – відмінна
Мінімальна вага, кг	20	20	20	0.5	0.1

Мінімальна вага відповідає детекторам для енергій гамма-випромінювання до 500 МеВ, енергетична роздільна здатність залежить від конкретного типу детектора [8].

Як зазначалось вище, системи з колімованими детекторами та кодовою апертурою втрачають свої властивості стосовно розрізнення в дальньому радіаційному полі та в цьому випадку еквівалентні системам з рухливими детекторами. Системи комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами можуть працювати в дальньому радіаційному полі, мають згідно з таблицею найменшу вагу в порівнянні з іншими системами. Тому зрозуміло, що наразі саме системи з рухливими детекторами та комптонівської візуалізації придатні для застосування на БПЛА.

Гамма-випромінювання належать до електромагнітного випромінювання та знаходиться у кінці короткохвильового, високоенергетичного діапазону з довжиною хвилі менше $2 \cdot 10^{-10}$ м. Це випромінювання є найбільш проникним серед видів радіоактивного випромінювання [12]. Тому на виявлення саме гамма-випромінювання націлені повітряні системи радіаційного моніторингу.

Мета статті. Головною метою цієї статті є аналіз особливостей застосування засобів ДЗЗ для гамма-моніторингу у вигляді систем комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами, розташованими на платформах БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Загальні вимоги до системи гамма-моніторингу на платформі БПЛА наведено у статті [2]. Обладнання для виявлення радіації має бути незалежним модулем. Модуль визначення місцеположення складатиметься з GPS, що контролюється мікроконтролером. На БПЛА може бути встановлена відеокамера для візуалізації місцезнаходження даних. Модулі повинні живитися від батареї малих розмірів та ваги. Зібрані дані повинні передаватися на наземну станцію, розташовану в базовому таборі, в режимі реального часу за допомогою телеметричної системи модуля радіочастотного зв'язку. Наземні модулі відображають цифрові карти, взяті, наприклад, з онлайн-карт Google maps. Система повинна бути укомплектована програмним забезпеченням для обробки та інтеграції даних про характеристики радіаційного випромінювання, координати місцезнаходження, висоту.

Відоме застосування системи для розвідки наслідків витоку радіації на атомній станції Фукусіма в Японії [13]. Для дистанційного вимірювання розподілу радіації в середині будівель АЕС "Фукусіма" було розроблено систему дистанційної радіаційної візуалізації з використанням легкої компактної камери Комптона. Система базувалась на мультікоптері, на якому встановлено: камеру Комптона, оптичну камеру, закріплених на кардановому підвісі; бортовий комп'ютер; GPS-приймач, акумулятор живлення (рис. 6, а). Комптонівська камера складалась з двох частин: сенсора гамма-променів, блоку обробки сигналів. Вага всієї установки не перевищувала 1 кг. Гамма-сенсор складався з двох частин - розсіювача та поглинача (рис. 6, б). Кожна частина складалась з багатоелементного сцинтилятора, поєднаного з багатопіксельним лічильником фотонів. Відстань між розсіювачем та поглиначем становила 23,5 мм. Гамма-сенсор з'єднувався з блоком обробки сигналів, який реєстрував і обробляв інфо-

рмацію про положення взаємодії гамма-квантів і значенням енергії, що виділялась в розсіювачі і поглиначі. Оброблені гамма-сигнали та оптичні зображення від оптичної камери надходили на комп'ютер. Для ідентифікації джерела радіаційного випромінювання БПЛА зависав над джерелом радіаційного випромінювання на 3 хвилини на висоті близько 2 метрів. Радіаційні зображення реконструювались методом зворотної проєкції і накладалися на оптичні зображення - для візуалізації радіоактивних речовин (рис. 6, в) [13].

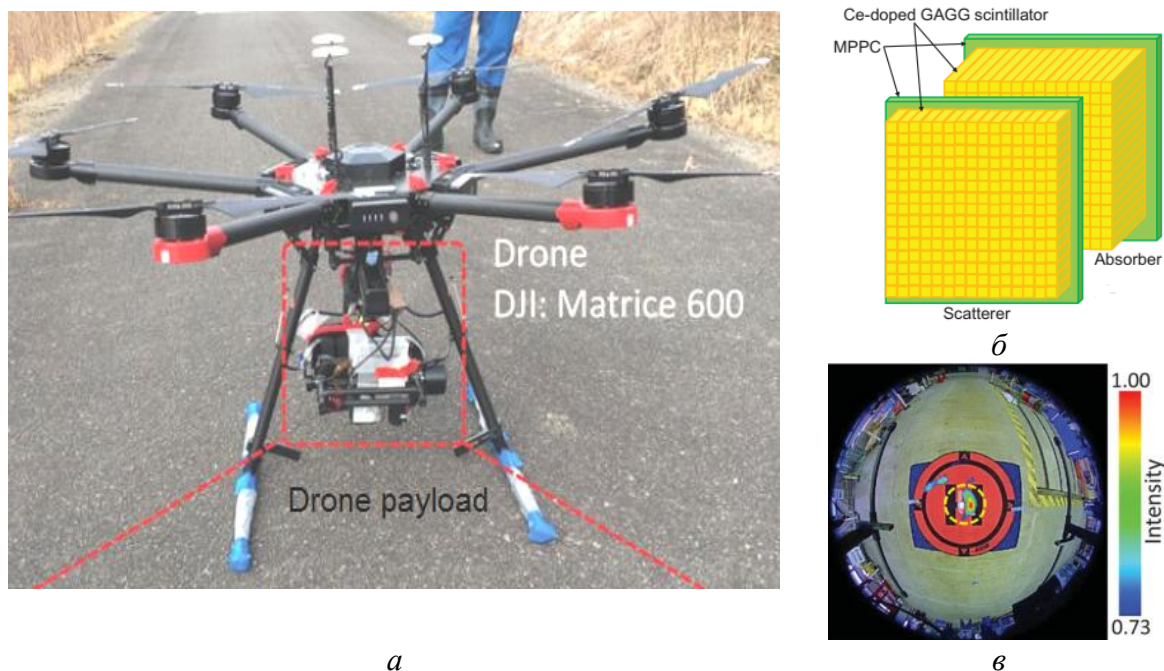


Рис. 6. Системи дистанційної радіаційної розвідки на основі камери Комптона:
 а – зовнішній вигляд системи на платформі мультикоптера; б – схема гамма-сенсора;
 в – візуалізація «гарячої точки» на підлозі споруди АЕС [13]

Систему дистанційного радіаційного моніторингу на платформі БПЛА для картографування ядерних могильників та визначення характеристик їх радіаційного випромінювання було використано на території зони відсудження навколо Чорнобильської АЕС [14]. БПЛА коптерного типу містила: гіростабілізовану платформу, на якій розміщувалась система радіаційного моніторингу GR-Smart; давачі орієнтації, швидкості та напрямку польоту; GPS-приймач; радіоканал зв'язку з наземною станцією. Бортова система GR-Smart зберігала під час польоту: географічні координати, висоту, тиск, температуру та спектрометричні дані. Комп'ютеризована наземна станція виконувала: прийом даних через Wi-Fi від GR-Smart; опрацювання даних; ведення бази даних; побудову спектрів радіонуклідів та кількості відліків за секунду; виявлення локальних зон радіоактивного забруднення; визначення потужності дози гамма-випромінювання; визначення координат точкових джерел гамма-випромінювання; побудову контурної карти розподілу гамма-випромінювання та документування даних радіаційного моніторингу.

Основним елементом GR-Smart є спектрометр – аналізатор гамма-випромінювання на основі йодиду натрію NaI (Tl) з кремнієвим фотопомножувачем. Спектральна інформація накопичується у вигляді «амплітуда – час». Інформація від п'яти детекторів з частотою збору гамма-квантів 10 Гц синхронізувалась в одному комплексному детекторі. Канал передачі даних Wi-Fi забезпечував передачу інформації в режимі реального часу на відстань до 1 км. За допомогою система GR-Smart можна обстежувати 3 км² за годину. Тривалість польоту – 40 хвилин. Заміна батареї триває 5 хвилин. Тому за один день БПЛА здатен обстежити до 21 км² [14].

Для встановлення зв'язку між показами спектрометра і значеннями інтенсивності радіоактивного забруднення було проведено калібрування підсистеми GR-Smart. Для цього було підготовлено калібрувальний майданчик на території Чорнобильської зони з паспортизованими параметрами активності радіонуклідів, отриманими за допомогою наземних вимірювань з висоти 0,5 м. Для таких же радіонуклідів планувалось виконувати обстеження в Чорнобильській зоні. Далі, були виміряні інтенсивності іонізуючого випромінювання над калібрувальним майданчиком та поблизу нього з БПЛА з висоти 10 м. На основі вимірів були сформовані масиви калібрувальних параметрів. За допомогою системи віддаленого радіаційного моніторингу було виконано аерознімання ядерних могильників на території піщаного плато Чорнобильської зони з висоти 30 м та швидкості БПЛА 2,8 м/с (рис. 7) [14].

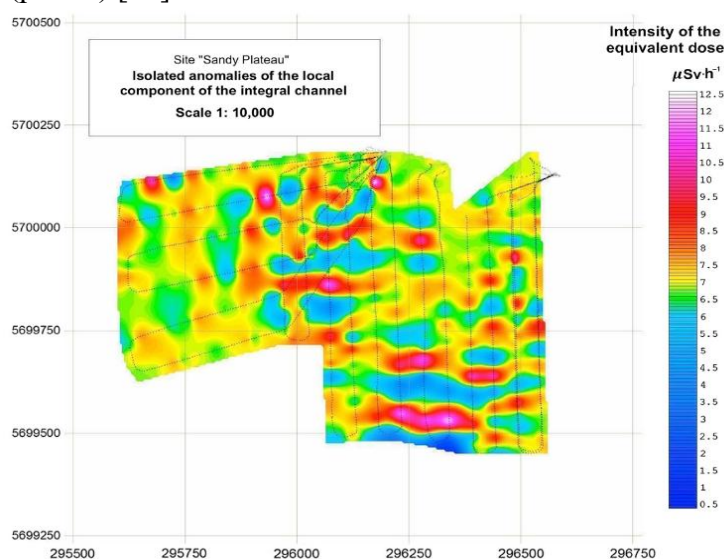


Рис. 7. Карта розподілу еквівалентної дози гамма-випромінювання радіоактивних джерел по території піщаного плато [14]

У роботі [15] наведено відомості стосовно застосування БПЛА вертикального зльоту і посадки з фіксованим крилом (the vertical take-off and landing - VTOL) в якості платформи для повітряного гамма-картографування (рис. 8, а). Така система є корисною для реагування на ядерні аварії, коли терміново потрібно виконати картографування місцевості, а також розвідку корисних копалин і зйомки радіоактивних шахтних майданчиків. VTOL має масу 4,5 кг, крейсерську швидкість 60 км за годину, несе корисне навантаження 800 г, має стійкість до вітру зі швидкістю 45 км за годину, час польоту становить 55 хв. До корисного навантаження належить GPS-приймач та система автономного повітряного радіаційного картографування. До її складу входять: сцинтилятор на кристалі йодиду цезію CsI(Tl); напівпровідниковий детектор на основі телуриду кадмію-цинку - щоб додати можливості гамма-спектрометричного картографування для енергій понад 1,4 MeV; GPS-приймач. БПЛА має лідар та блок живлення. Радіологічні дані зберігаються і передаються через стільниковий зв'язок – для отримання даних в реальному часі [15].

Для тестування системи VTOL було використано стару уранову копальню. Польоти виконувались за галсами в автоматичному режимі на висоті 70 м зі швидкістю 15 м/с з інтервал між галсами 20 м. Гамма-спектри зібрані з частотою 10 Гц, які під час постобробки були об'єднані в більші часові інтервали 1, 2 і 5 Гц. Отримані спектральні інтенсивності завдяки калібруванню були перетворені в потужності еквівалентної дози. Кожне вимірювання було скориговано за різницю висот над рівнем землі з використанням ви-

соти, зафіксованої LiDAR з борту БПЛА, та з урахуванням коефіцієнта лінійного ослаблення повітря зі стандартною температурою і тиском для відповідних енергій фотонів та приведене до висоти 1 м над землею поверхнею.

Візуалізація оброблених даних виконана в програмі ArcGIS Pro з інтерполяцією радіометричних даних за допомогою інструменту Empirical Bayesian Kriging. У результаті була отримана карта місцевості з розподілом потужностей доз на території уранової копальні у вигляді ізоліній рівних потужностей доз (рис. 8, б) [15].

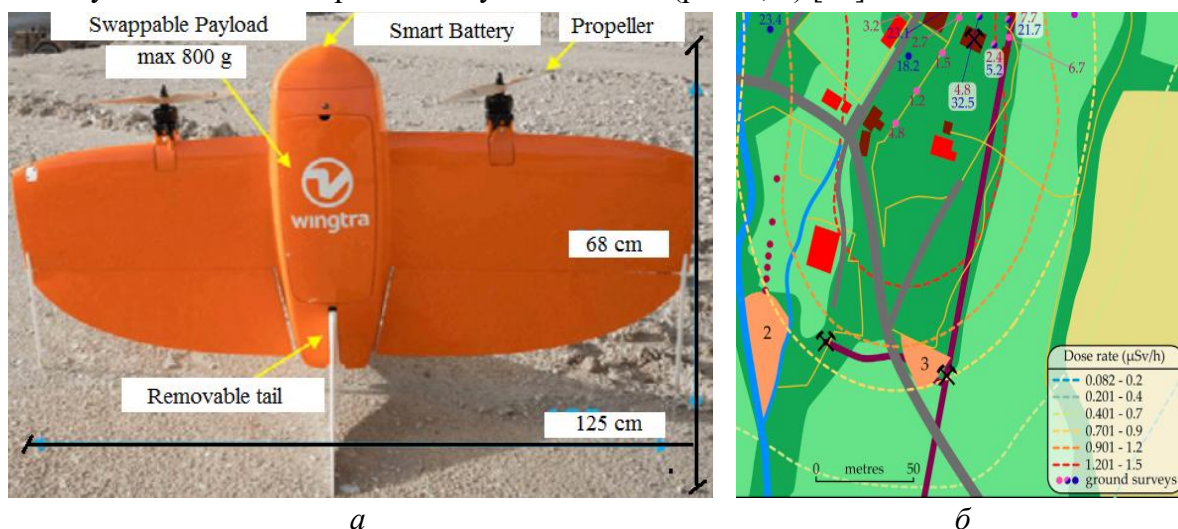


Рис. 8. БПЛА з вертикальним зльотом і посадкою з фіксованим крилом та результати гамма-знімання:

а – корпус БПЛА, що містить корисне навантаження до 800 гр, змінний хвіст, «розумну» батарею, пропелер; б – карта місцевості з розподілом потужностей доз гамма-випромінювання [15]

Система дистанційного виявлення гамма-випромінювання з використанням безпілотних систем та готових компонентів наведена в роботі [16]. Вона розроблена з метою використання у складі мобільної платформи ДЗЗ, зокрема, з БПЛА. Система встановлюється на платформу БПЛА DJI Matrice 200 та містить модулі: детектор гамма-випромінювання; аналогово-цифровий перетворювач електричних сигналів від детектора та їх зберігання; головний модуль, який виконує керування та зв'язок з іншими модулями; радіочастотний модуль – для зв'язку з наземною станцією; давач температури; GPS-модуль; карта пам'яті, де зберігаються спектральні дані та значення температури; блок живлення напругою 5 вольтів.

Як чутливий матеріал для детектора гамма-випромінювання використано кристал на основі йодиду цезію CsI(Tl) розміром 10×10×40 мм. Йодид цезію має високий коефіцієнт поглинання гамма-випромінювання завдяки його відносно високій щільності та атомному номеру. Він досить міцний і добре підходить для застосувань у середовищі, де зустрічаються вібрація. Імпульси світла перетворюються в електричні сигнали за допомогою кремнієвого фотоелектричного помножувача (SiPM). Системи може містити кілька каналів виявлення гамма-випромінювання, що працюють одночасно, на основі сцинтиляційних детекторів. Це потенційно підвищує статистичну достовірність виявлення та ідентифікацію джерела радіоактивного випромінювання. З використанням давача температури відбувається керування SiPM – для забезпечення його стабільної напруги. Для зменшення впливу електромагнітних завад система розташована в середині алюмінієвого корпусу та використано версію радіочастотного приймально-передавального модуля,

який працює на частоті 2,4 ГГц. Він може досягати відстані зв'язку до 2 км. Аналогічний модуль, що діє як радіоприймач, використовувався для декодування і отримання даних на наземній станції. Передача даних від БПЛА виконується щосекунди [16].

Графічний інтерфейс наземної станції дозволяє будувати спектри радіонуклідів, а також кількості відліків за секунду (counts per second - CPS) з прив'язкою до координатної інформації – для ідентифікації місцеположення джерела гамма-випромінювання. Реакція системи детектування протестована шляхом опромінення сцинтиляторів закритими каліброваними гамма-випромінювачами ^{137}Cs , ^{60}Co та ^{241}Am . Ці дані були використані для енергетичного калібрування системи детектування, тобто приведення у відповідність каналів виявлення інтенсивності випромінювання до відповідних енергій вказаних гамма-випромінювачів. Система пройшла апробацію для виявлення радіоактивного джерела ^{137}Cs потужністю 500 МБк. Система змогла ідентифікувати «гарячу точку» радіоактивного поля (рис. 9, а) та визначити природу гамма-випромінювача (рис. 9, б) [16].

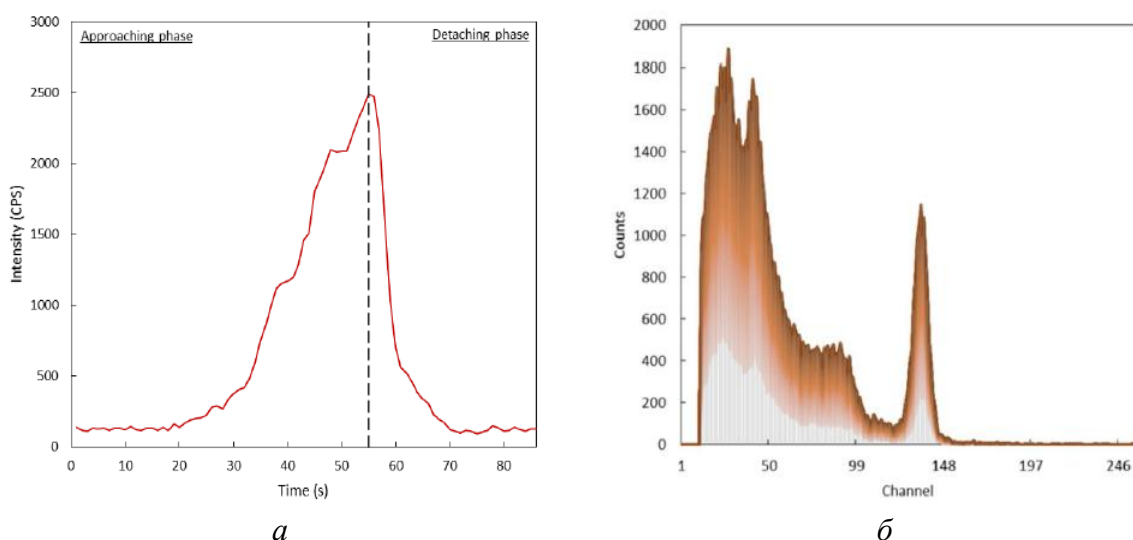


Рис. 9. Результати випробувань системи виявлення радіації:

а – виявлена активність за кількістю відліків за секунду на відстані 55 м від точки старту під час польоту БПЛА; б – зібраний спектр гамма-випромінювання джерела ^{137}Cs , як залежність інтенсивності випромінювання від енергетичних каналів його реєстрації [16]

Систему виявлення джерел гамма-випромінювання з вдосконаленим детектором радіації (Advanced Radiation Detector for UAV Operations – ARDUO), для розташування на платформі БПЛА у вигляді гвинтокрила з вантажопідйомністю до 6 Кг наведено в статті [17]. Система містить: барометр, приймач GNSS, компас, інерційний вимірювальний прилад – для визначення свого положення і орієнтації кожні 0,02 секунди. Детектор ARDUO має 8 кристалів CsI(Tl) розміром $2,8 \times 2,8 \times 5,6$ см, розміщених у самозахищеній конфігурації, з кремнієвими фотопомножувачами. Автопілот БПЛА реєструє широту, довготу, висоту над рівнем землі та орієнтацію за допомогою розширеного фільтра Кальмана й набору перелічених давачів, надаючи кожному вимірюванню випромінювання позицію та координати для подальшого аналізу. Інформація щосекунди передається на станцію керування операторові (рис. 10). Номінальні параметри польоту для ARDUO становили: висота 10 м, швидкість 2 м/с, відстань між галсами пошуку 4 м.

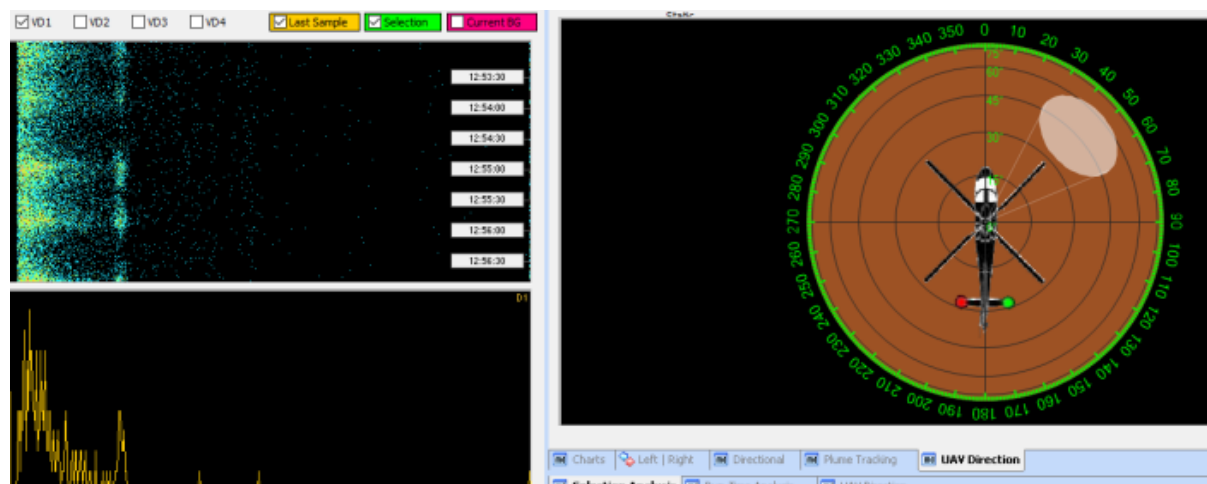


Рис. 10. Перегляд даних на дисплеях оператора в реальному часі над джерелом гамма-випромінювання ^{137}Cs : верхній лівий дисплей на вертикальній осі показує час; енергію на горизонтальній осі; її кількість по площині дисплея; нижній лівий дисплей показує поточний односекундний енергетичний спектр для одного детектора (для ідентифікації ізотопу); на правому дисплеї показано поточну реконструкцію напрямку, що вказує на джерело за азимута 50° за кута підйому близько 45° [17]

Сутність самозахистної конфігурації детектора у наступному. Кристали ближчі до джерела випромінювання екранують кристали, які розташовані за ними. Тому кристали ближчі до джерела митимуть відносно вищу швидкістю підрахунку гамма-квантів, ніж екрановані кристали (рис. 11, а). Використовуючи відносні швидкості лічби в кожному з восьми кристалів, можна розрахувати вектор напрямку $v = (u, v, w)$ на джерело у трьох вимірах [17]

$$u = c_1 + c_5 - c_3 - c_7, \tag{1}$$

$$v = c_2 + c_6 - c_4 - c_8, \tag{2}$$

$$w = c_5 + c_6 + c_7 + c_8 - c_1 - c_2 - c_3 - c_4, \tag{3}$$

де c_i - кількість відліків за секунду в кристалі під номером i .

Азимут відносно напрямку на ніс гвинтокрила і нахил відносно умовного горизонту обчислюється за формулами (рис. 11, а) [17]

$$Azimuth = \arctg\left(\frac{u}{v}\right) - 45^\circ, \tag{4}$$

$$Elevation = \arccos\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}\right) - 90^\circ. \tag{5}$$

Алгоритм реконструкції напрямку дозволяє видавати результат для будь-якого спектра в реальному часі до ідентифікації ізотопу та є результативним для виявлення місцеположення навіть сильно екранованих ізотопів або змішаних полів випромінювання завдяки широкому діапазону енергій від 0,1 MeV до 3,0 MeV.

Систему виявлення джерел гамма-випромінювання з детектором ARDUO спроможна виконувати гамма-знімання території з відомими ізотопами, розташованими на ній. Для цього під час польоту БПЛА виконується збір гамма-квантів та побудова односекундних координатно орієнтованих спектрів (рис. 11, б). За зміною інтенсивності гамма-випромінювання у малих енергетичних вікнах конкретного ізотопу та відомими координатами будуватиметься карта його розповсюдження в універсальній поперечній проєкції Меркатора [17].

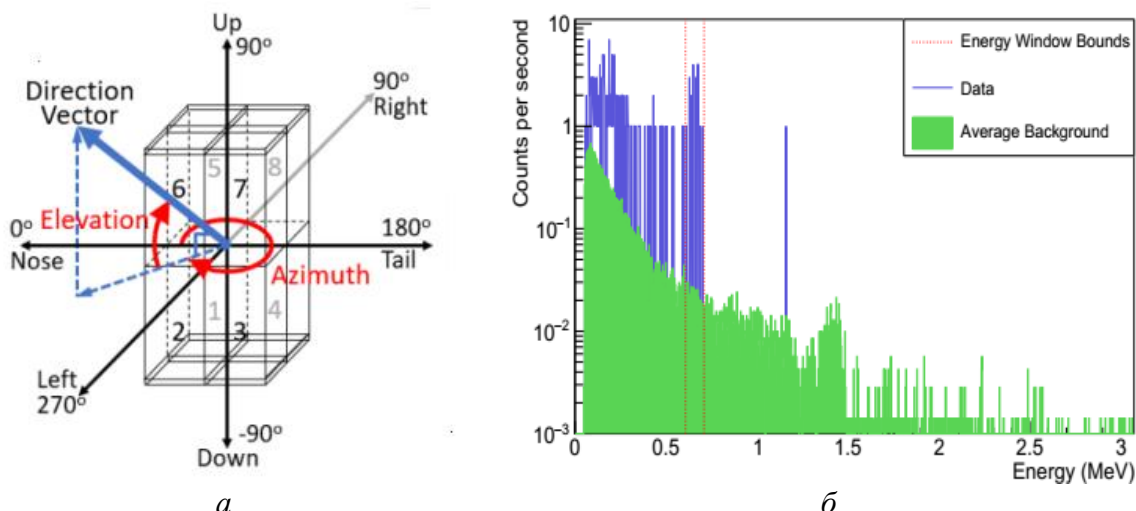


Рис. 11. До ідентифікації напрямку на ізотоп та його необроблений спектр: а – сутність самозахисту детектора ARDUO; б) – зібраний одnoseкундний спектр гамма-випромінювання джерела ¹³⁷Cs з фотоніком для енергії 0,662 MeV у межах малого енергетичного вікна шириною 100 KeV) [17]

У статті [18] представлено розробку нової мініатюрної системи для локалізації та оцінки компактних джерел гамма-випромінювання на платформах міні роторних літальних апаратів (рис. 12, а). Система використовує односенсорну камеру Комптона. У камері Комптона використано детектор на основі телуриду кадмію (CdTe) для вимірювання продуктів комптонівського розсіювання у вигляді вхідних високоенергетичних гамма-фотонів. Камера може також виявляти β частки і важкі іони. Сліди частинок можуть бути класифіковані для визначення природи джерела випромінювання. На відміну від двосенсорної камера [13], використано лише один давач для вимірювання продуктів розсіювання. Для цього було використано напівпровідниковий CdTe детектор товщиною 2 мм, здатний викликати у своїй товщі ефекти розсіювання, а також фіксувати продукти розсіювання багатопіксельним сенсором (рис. 12, б) [18].

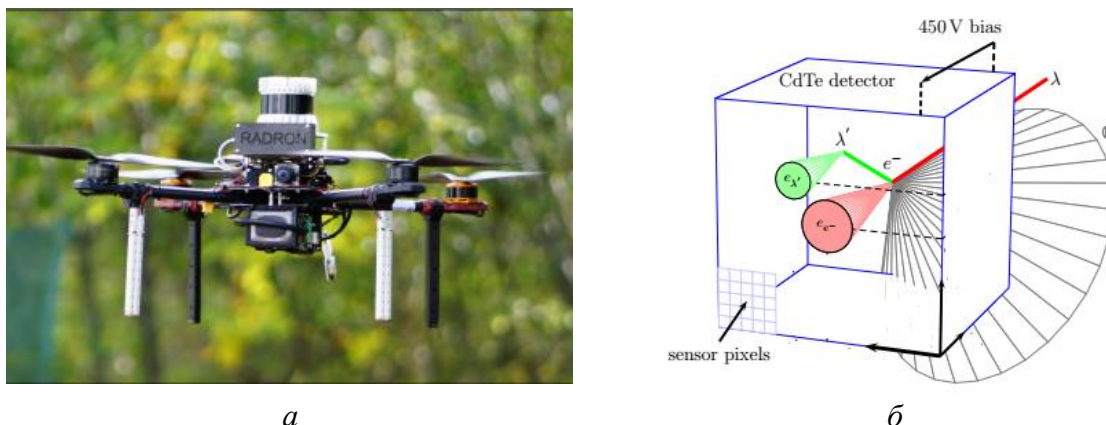


Рис. 12. Мініатюрна система локалізації для виявлення та оцінки компактних джерел гамма-випромінювання: а – зовнішній вигляд системи на платформі міні-БПЛА); б – ілюстрація ефекту комптонівського розсіювання в детекторі CdTe товщиною 2 мм та напругою 450 в, коли вхідний гамма-фотон λ змінює свій імпульс у напрямку λ' від центру розсіювання та утворює електрон e⁻ [18]

Висновки. У статті виконано огляд існуючих систем візуалізації радіаційного випромінювання: з колімованими детекторами; з кодовою апертурою; з обертовою модуляцією; комптонівської візуалізації; з рухливими детекторами. У результаті стає зрозумілим, що саме системи комптонівської візуалізації та системи з рухливими детекторами завдяки спроможності працювати у віддаленому радіаційному полі та невеликим ваговим характеристикам наразі придатні для застосування на платформах БПЛА.

Аналіз особливостей застосування засобів ДЗЗ для гамма-моніторингу у вигляді систем комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами дозволяє зробити такі висновки:

- наразі системи комптонівської візуалізації дозволяють виконувати виявлення джерел радіаційного випромінювання на малих висотах та малих швидкостях із затримкою над джерелом у кілька хвилин - для ідентифікації джерела, що робить їх ефективними для пошуку у локальних місцях міського середовища та приміщеннях, однак не дозволяє виконувати картографування значних територій радіаційного забруднення;

- системи з рухливими детекторами дозволяють проводити гамма-моніторинг у повному обсязі, а саме - виконувати пошук джерел радіоактивного випромінювання, здійснювати картографування природного підвищеного радіаційного фону та забруднених радіонуклідами значних територій.

Подальші перспективи досліджень полягають у вдосконаленні засобів та методів радіаційного моніторингу на платформах БПЛА у напрямку підвищення достовірності його результатів з використанням систем візуалізації на рухливих детекторах.

Список використаних джерел

1. Паспорт спеціальності 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія і картографія; Офіційний веб-портал Парламенту України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#top>.
2. Widodo, S. Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN / S. Widodo, A. Abimany, R. Apribra // IOP Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1436. – Pp. 1-7. DOI:10.1088/1742-6596/1436/1/012126.
3. Терещук, О. І. Пристрій визначення положення вертикалі на безпілотних літальних апаратах, призначених для аерознімання / О. І. Терещук, С. Д. Крячок, В. Ю. Беленок, Л. С. Мамонтова, О. Л. Бойко // Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології. – 2021. – № 3 (25). – С. 273-287. DOI:10.25140/2411-5363-2021-3(25)-273-287.
4. Chierici, A. High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components / A. Chierici, A. Malizia, D. Giovanni, R. Ciolini, F. d'Errico // Sensors. – 2022. – Vol. 3(22). – Pp. 1-18. DOI:10.3390/s22031078.
5. Махньов, О. І. Розробка оптимальної конструкції системи візуалізації гамма-випромінювання / О. І. Махньов // Електронні системи та сигнали. – 2019. – № 3 (2). – С. 6-10.
6. Molnar, A. Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure / A. Molnar, Z. Domozi, I. Lovas // Sensors. – 2021. – Vol. 21 (14). – Pp. 2-15. DOI: 10.3390/s21144930.
7. Ahmad, M. I. Ionizing Radiation Monitoring Technology at the Verge of Internet of Things / M. I. Ahmad, M. H. Ab. Rahim, R. Nordin, F. Mohamed, A. Abu-Samah, N. F. Abdullah // Sensors. – 2021. – Vol. 21 (22). – Pp. 1-29. DOI: 10.3390/s21227629.
8. Vetter, K. Gamma-ray Imaging Methods [Electronic resource] / K. Vetter, L. Mihailescu, K. Nelson, J. Valentine, D. Wright. – Lawrence Livermore national laborator, 2006. – 70 p. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/241908137_Gamma-ray_Imaging_Methods.
9. Amgarou, K. A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager / K. Amgarou, V. Paradiso, A. Patoz, F. Bonnet, J. Handley, P. Couturier, F. Beckerc, N. Menaa // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 11. – Pp. 1-35. DOI: 10.1088/1748-0221/11/08/P08012.
10. Paradiso, V. A panoramic coded aperture gamma camera for radioactive hotspots localization. Journal of Instrumentation / V. Paradiso, K. Amgarou, N. Blanc De Lanaute, V. Schoepff, G. Amoyal, C. Mahe, O. Beltramello, E. Liénard // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12. – Pp. 1-16. DOI:10.1088/1748-0221/12/11/P11010.
11. Махньов, О. І. Система візуалізації гамма-випромінювання : дипломний проект ... бакалавра : 6.050902 Радіоелектронні апарати [Електронний ресурс] / Олександр Ігорович Махньов. – Київ, 2019. – 94 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov_bakalavr.pdf.

12. Gordon, G. Practical Gamma-ray Spectrometry [Electronic resource] / G. Gordon. – 2nd Edition. – Access mode: <https://nna1989.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/05/gordon-gilmore-practical-gamma-ray-spectroscopy-2008.pdf>.
13. Yuki, S. Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone / S. Yuki, O. Shingo, T. Yuta, K. Masaaki, T. Yuta, K. Kuniaki, N. M. Hiroko, I. Ryo, S. Toshikazu, T. Tatsuo // *Journal of Nuclear Science*. – 2018. – Vol. 55 (1). – Pp. 90-96. DOI:10.1080/00223131.2017.1383211.
14. Burtniak, V. Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chornobyl nuclear accident site / V. Burtniak, Yu. Zabulonov, Ma. Stokolos, Le. Bulavin, V. Krasnoholovet // *Remote Sens*. – 2018. – Vol. 12 (4). – Pp.1-13. DOI: 10.1117/1.JRS.12.046007.
15. Woodbridge, E. Airborne gamma-ray mapping using fixed-wing vertical take-off and landing (VTOL) uncrewed aerial vehicles / E. Woodbridge, Connor, D.T., Y. Verbelen, D. Hine, T. Richardson, T.B. Scott // *Front. Robot. AI* 10:1137763. – Pp.1-15. DOI: 10.3389/frobt.2023.113776.
16. Chierici, A. A High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Component / A. Chierici, A. Malizia, D. Giovanni, R. Ciolini, F. d'Errico // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22 (3). – Pp. 1-18. DOI:10.3390/s22031078.
17. In-Flight Performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARDUO) [Electronic resource] / C. M. Chena, L. E. Sinclair, R. Fortinc, M. Coylec, C. Samson // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – Vol. 954. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218316772?via%3Dihub>.
18. Gamma Radiation Source Localization for Micro Aerial Vehicles with a Miniature Single-Detector Compton Event Camera [Electronic resource] / Tomas Báča, Petr Štibinger, Daniela Doubravova, Daniel Turecek, Jaroslav Solc Jan Rusnak, Martin Šaska, Jan Jakubek // 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/345554999_Gamma_Radiation_Source_Localization_for_Micro_Aerial_Vehicles_with_a_Minature_Single-Detector_Compton_Event_Camera.

References

1. *Pasport spetsialnosti 05.24.01 - heodeziya, fotohrammetriya ta kartohrafiya, v0047330-07-BP [Specialty passport 05.24.01 - geodesy, photogrammetry and cartography]*. (2007). <https://zakkon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#Text>.
2. Widodo, S., Abimanyu, A., & Apribr R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *IOP Journal of Physics: Conf. Series, 1436*, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126>.
3. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Mamontova, L., & Boyko. (2021). Prystriy vyznachennya polozhennya vertykali na bezpilotnykh lital'nykh aparatakh, pryznachenykh dlya aeroznimannya [Device for determining the vertical position on unmanned aerial vehicles intended for aerial photography]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical sciences and technologies, 3(25)*, 273-287. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-273-287](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-273-287).
4. Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors, 3(22)*, 1-18. <https://doi.org/10.3390/s22031078>.
5. Makhnev, O. I. (2019). Rozrobka optimal'noyi konstruktsiyi systemy vizualizatsiyi hamma-vyprominyuvannya [Development of the optimal design of the gamma radiation imaging system]. *Elektronni systemy ta syhnaly - Electronic systems and signals, 3(2)*, 6-10.
6. Molnar, A., Domozi, Z., & Lovas, I. (2021). Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure. *Sensors, 21(14)*, 2-15. <https://doi.org/10.3390/s21144930>.
7. Ahmad, M.I., Ab. Rahim, M.H., Nordin, R., Mohamed, F., Abu-Samah, A., & Abdullah, N.F. (2021). Ionizing Radiation Monitoring Technology at the Verge of Internet of Things. *Sensors, 21(22)*, 1-29. <https://doi.org/10.3390/s21227629>.
8. Vetter, K., Mihailescu, L., Nelson, K., Valentine, J., & Wright, D. (2006). *Gamma-ray Imaging Methods*. https://www.researchgate.net/publication/241908137_Gamma-ray_Imaging_Methods.
9. Amgarou, K., Paradiso, V., Patoz, A., Bonnet, F., Handley, J., Couturier, P., Beckerc, F., & Mena, N. (2016). *A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/08/P08012/pdf>.

10. Paradiso, V., Amgarou, K., Blanc De Lanaute, N., Schoepff, V., Amoyal, G., Mahe, C., Beltramello, O., & Liénard, E. (2017). *A panoramic coded aperture gamma camera for radioactive hotspots localization*. *Journal of Instrumentation*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/11/P11010/pdf>
11. Makhnyeva, O. I. (2019). *Systema vizualizatsiyi hamma-vyprominyuvannya [Gamma radiation imaging system]*. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov_bakalavr.pdf
12. Gordon, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981/>
13. Yuki, S., Shingo, O., Yuta, T., Masaaki, K., Yuta, T., Kuniaki, K., Hiroko, N. M., Ryo, I., Toshikazu, S., & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science*, 55(1), 90-96. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211>.
14. Burtniak, V., Zabulonov, Yu., Stokolos, Ma., Bulavin, Le., & Krasnoholovet, V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, 12(4), 1-13. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.046007>.
15. Woodbridge, E., Connor, D., Verbelen, Y., Hine, D., Richardson, T., & Scott, T. (2023). *Airborne gamma-ray mapping using fixed-wing vertical take-off and landing (VTOL) uncrewed aerial vehicles*. <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2023.1137763/full>.
16. Chierici, A., Malizia, A., Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). A High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors*, 22(3), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s22031078>.
17. Chena, C.M., Sinclair, L.E., Fortinc, R., Coyle, M., & Samson, C. (2020). *In-Flight Performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARDUO)*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218316772?via%3Dihub>.
18. Baca, T., Stibinger, P., Doubravova, D., Turecek, D., Solc, J., Rusnak, J., Saska, M., Jakubek, J. (2021). *Gamma Radiation Source Localization for Micro Aerial Vehicles with a Miniature Single-Detector Compton Event Camera*. https://www.researchgate.net/publication/345554999_Gamma_Radiation_Source_Localization_for_Micro_Aerial_Vehicles_with_a_Minature_Single-Detector_Compton_Event_Camera.

Отримано 25.09.2024

UDC 528.83

Sergiy Kryachok

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: geodesist2015@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>
ResearcherID: [N-3061-2016](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501), SCOPUS Author ID: [57204332476](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501)

APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR RADIATION MONITORING

Currently, there is an intensification of existing and the emergence of new terrorist regimes. This may provoke their use of means of mass destruction, including nuclear charges. Therefore, the development of means of remote sensing of the Earth for monitoring radioactive radiation on UAV platforms is relevant. Monitoring combines the search for sources of radioactive radiation, mapping of the natural elevated radiation background, and territories contaminated with radionuclides.

Research, diagnosis, and detection of radiation become effective with the development of methods of its visualization. Visualization includes detection and computer processing of count and spectral information about radiation. This makes it possible to obtain an optical image of radiation, study the structures of the radiation source, and localize its location.

The purpose of this work is to analyze the features of the application of remote sensing of the Earth for gamma monitoring in the form of Compton visualization systems and with mobile detectors located on UAV platforms.

The article provides an overview of existing radiation imaging systems with collimated detectors, coded aperture, rotary modulation, Compton visualization, with moving detectors. It has been established that Compton visualization and systems with moving detectors are capable of operating in a remote radiation field, have low weight, and are therefore most suitable for use on UAV platforms.

Analysis of research and publications on the application of currently existing Compton visualization systems and mobile detectors on UAV platforms allows us to draw the following conclusions. Compton imaging systems are effective only for detecting radiation sources in local locations of the urban environment and premises. Systems with mobile detectors allow gamma monitoring to be carried out in full-on large areas.

Keywords: unmanned aerial vehicles; radiation monitoring; visualization systems; remote sensing of the Earth.

Fig.: 12. Table: 1. References: 18.