

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-415-429](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-415-429)

УДК 528.83

Сергій Дмитрович Крячок¹, Олексій Іванович Терещук²¹кандидат технічних наук, доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: geodesist2015@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>ResearcherID: [N-3061-2016](https://www.researcherid.com/N-3061-2016). SCOPUS Author ID: [57204332476](https://scopus.com/authorid/57204332476)²кандидат технічних наук, доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: olexter1957@gmail.com. ORCID: orcid.org/0000-0001-6433-9351ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016>. SCOPUS Author ID: [57211315791](https://scopus.com/authorid/57211315791)Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=ru&user=vZtF4YIAAAAJhttps://scholar.google.com.ua/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk&citsig=AMstHGRJW5NzJv81Vio_Xp9rgjtO_Wm2GAIndex Copernicus: http://journals.indexcopernicus.com/+++_p24781806.3.htm

СИСТЕМА КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ПЛАТФОРМІ БПЛА

У статті розглянуто вдосконалену систему картографування території радіаційного забруднення з використанням безпілотних літальних апаратів коптерного типу. Запропонований підхід поєднує повітряне гамма-зондування з низьких висот, створення актуальної ортофотокартографічної основи та маркування зон підвищеного радіаційного фону безпосередньо з борту БПЛА. Застосування модульної структури обладнання, механізму спуску детектора та уточнених висотних і метеорологічних поправок дозволяє підвищити точність і достовірність результатів, наблизивши їх до наземних вимірювань, а також зменшити ризики опромінення персоналу під час радіаційного моніторингу.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; гамма-зондування; дистанційне зондування Землі.

Рис.: 3. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Впродовж останніх десятиліть спостерігається бурхливий розвиток автоматизованих систем, що покликані полегшити виконання виробничих, рутинних завдань [1]. Наразі автоматизовані системи знайшли свій розвиток у безпілотних апаратах (БА). Наземні БА використовуються для прибирання квартир та подвір'я, у сільському господарстві – для точного землеробства, огляду полів, доставки матеріалів на ферму [2; 3]. У військовій сфері наземні БА використовуються для ведення розвідки, мінування, доправлення до позицій боєкомплектів, транспортування поранених із поля бою [4].

Серед БА найбільш масово використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). У сільському господарстві за допомогою БПЛА виконується моніторинг стану сільськогосподарських угідь, оперативна оцінка стану земель, прогноз врожайності [5; 6]. БПЛА знайшли застосування в лісовому господарстві – для визначення характеристик деревостою, пошуку місць займання, виявлення місць незаконної вирубки дерев, виявлення та запобігання випадкам браконьєрства [7]. Аерознімання територій та лінійних об'єктів виконується також за допомогою БПЛА [8]. БПЛА залучаються до пошуку та картографування мінних полів [9].

Сьогодні спостерігається загрозлива тенденція розповсюдження ядерної зброї, її розміщення на нових територіях, небезпека пошкодження та підриву ядерних реакторів і руйнування місць зберігання радіоактивних відходів. Такі дії можуть викликати радіаційне забруднення значних територій. Тому актуальним питанням є вдосконалення систем картографування територій радіаційного забруднення на платформах БПЛА з метою ухвалення своєчасних та адекватних управлінських рішень для локалізації негативних наслідків.

Постановка проблеми. Картографування територій радіаційного забруднення входить у задачі радіаційного моніторингу довкілля [10]. Повітряні системи радіаційного моніторингу у своїй більшості призначені на виявлення саме гамма-випромінювання. Це пов'язано з тим, що гамма-випромінювання є найбільш проникним серед інших видів радіоактивного випромінювання [11].

У минулому як платформу для повітряного гамма-зондування використовували літаки та гелікоптери. Висота польоту складала приблизно 150 м над середнім рівнем місцевості, а швидкість сягала 60 м/с [12]. Однак відомо, що роздільна здатність повітряного гамма-зондування безпосередньо залежить від висоти польоту над землею поверхнею, швидкості польоту й контрасту між фоновим випромінюванням і локалізованими джерелами [13]. Завдяки меншим швидкостям та здатності тримати низькі висоти польоту БПЛА дозволяють значно підвищити роздільну здатність радіаційного зондування. Крім того, виготовлення, приладове наповнення та експлуатація БПЛА мають значно меншу вартість у порівнянні з літаками та гелікоптерами. [14]. Людство має досвід практичного застосування БПЛА для виконання гамма-зондування. Так, ці платформи використовувались для розвідки витоку радіації внаслідок цунамі на атомній станції Фукусіма у Японії [15]. Для пошуку та картографування місць захоронення ядерних відходів навколо Чорнобильської АЕС було успішно застосовано систему дистанційного радіаційного моніторингу на платформі БПЛА [16]. Елементна база та конструкція БПЛА постійно удосконалюються [17]. Покращуються навігаційні спроможності позиціонування в реальному часі й розробки технологій утримання повітряної платформи на заданому курсі [18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для проведення радіаційного моніторингу застосовують БПЛА літакового і коптерного типів. Так, у роботі [19] наведено опис системи повітряного гамма-картографування на платформі БПЛА вертикального злету і посадки з фіксованим крилом. Дослідження виконуються з висоти 70 м над місцем злету зі швидкістю 15 м/с та інтервалом між галсами 20 м. На борту БПЛА знаходиться система керування польотом, GPS-приймач, LiDAR, система виявлення та класифікації гамма-випромінювання на основі сцинтилятора CsI(Tl) і напівпровідникового детектора CZT та блок живлення. Радіологічні дані зберігаються і передаються через стільниковий зв'язок на наземну станцію опрацювання даних. Виміряні інтенсивності перетворюються в потужності еквівалентної дози. Для цього використовуються функції перетворення дози, отримані за допомогою коду моделювання Монте-Карло. Значення дози корегуються за різницю висот за виміряними висотами та враховують ослаблення випромінювання повітрям і приводяться до стандартного значення температурою і тиску для виявлених енергій фотонів та перераховуються до висоти 1 м над землею поверхнею. Візуалізація оброблених даних виконується в програмі ArcGIS Pro з інтерполяцією радіометричних даних за допомогою інструменту - емпіричний баєсівський кригінг. План польоту попередньо визначається пілотом за допомогою програми, встановленої на планшеті, що постачається разом з БПЛА.

У статті [20] наведено опис системи з використанням платформи БПЛА коптерного типу. Система призначена для ідентифікації природних радіонуклідів. На борту БПЛА знаходяться: сцинтиляційні детектори на основі CeBr_3 та NaI ; система GNSS-позиціонування; інерційний вимірювальний блок; компас; лазерний віддалемір; давачі температури й тиску; камера з видом від першої особи; система зв'язку для керування БПЛА; універсальна система мобільного зв'язку (UMTS) 4G/3G/2G – для передачі частини зашифрованих даних на наземну станцію; карта пам'яті; блок живлення. Для дослідження природних радіонуклідів у випадку рівнинної та не залісненої місцевості висота польоту складає 10 м. Швидкість польоту платформи 3 м/с. Для покращення якості вимірювань БПЛА може зависати над «гарячими» точками. Відстань між галсами приймається рівною 10 м. Мала висота гамма-зондування в такому випадку пов'язана з низьким рівнем радіоактивності, що зустрічається на територіях колишнього видобутку уранової руди – на відміну від значних рівнів, характерних для радіоактивних осадів після радіологічних і ядерних аварій. Калібрування детекторів за енергіями має свої

особливості Сцинтиляційний детектор на основі CeBr_3 об'ємом 700 см^3 забезпечує досить високу швидкість підрахунку, що покращує статистику. Це особливо важливо для виявлення слабких джерел гамма-випромінювання. Детектор відкалібрований на калібрувальній установці Medusa "Stonehenge". У результаті отримують файл калібрування Medusa (MCF), який можна використовувати в програмному забезпеченні для спектрального аналізу та виконувати автоматично енергетичне калібрування. Детектор на основі йодиду натрію NaI об'ємом 350 см^3 призначений для виявлення потужних джерел гамма-випромінювання. Його доводиться калібрувати вручну після кожної заміни батарей живлення. Для цього використовують еталонний зразок хлориду калію KCl . Калібрування ефективності детекторів виконане на калібрувальних майданчиках, які мають квадратні плити розміром сторони 20 м з еталонними значеннями радіоактивності [20].

Опрацювання результатів гамма-зондування територій виконується з використанням персонального комп'ютера за отриманими даними каналом зв'язку та з карти пам'яті. Питома активність радіонуклідів розраховується за алгоритмом, який містить аналітичну модель для прогнозування радіаційного сліду за різною висотою. Результати розрахунків уточнюються моделюванням Монте-Карло - для прогнозування інтенсивності та форми спектрів гамма-випромінювання як функції висоти. Для інтерполяції результатів гамма-зондування застосовується метод сплайн-інтерполяції з використанням контурної картографічної основи Google Earth. У підсумку створюються карти, на яких зміна концентрації природної радіоактивності відповідає зміні кольору її відображення [20].

Інформацію стосовно системи виявлення джерел гамма-випромінювання на платформі БПЛА коптерного типу наведено в роботах [19]. До складу повітряного компонента входять: детектор гамма-випромінювання; аналогово-цифровий перетворювач; модуль керування: модуль зв'язку з наземною станцією; давач температури – для стабілізації напруги живлення; GPS-модуль; карта пам'яті; блок живлення. Детектор гамма-випромінювання виготовлено на основі йодиду цезію CsI(Tl) розміром $10 \times 10 \times 40 \text{ мм}$. До системи виявлення гамма-випромінювання може бути підключено кілька детекторів, що забезпечує статистичну достовірність підрахунку та покращує ідентифікацію джерел. Дозиметрична й координатна інформація щосекунди передається на наземний сегмент системи радіоканалом на частоті $2,4 \text{ ГГц}$ у зашифрованому вигляді. На наземному сегменті виконується декодування сигналу та опрацювання інформації. За допомогою графічного інтерфейсу наземної станції виконується побудова спектрів радіонуклідів з їх координатною прив'язкою. Це дозволяє виявити природу джерела гамма-випромінювання та встановити його місцеположення. Енергетичне калібрування системи детектування було виконано з використанням каліброваних джерел гамма-випромінювачами: ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am .

Систему віддаленого радіаційного моніторингу представлено в роботі [19]. На платформі БПЛА у вигляді октокоптера знаходиться сегмент керування польотом та сегмент дистанційного зондування GR-Smart. До складу першого сегмента входять: блоки ручного керування та автоматичного керування; давачі швидкості та напрямку польоту, орієнтації у просторі; обладнання каналу зв'язку з наземним сегментом; блок операційного контролю; блок живлення. Сегмент дистанційного зондування GR-Smart містить: спектрометр з п'яти детекторів на основі йодиду натрію NaI (Tl) ; GPS-приймач; давачі температури повітря, тиску та висоти; Wi-Fi для передачі даних на наземний сегмент; карту пам'яті; блок операційного контролю. Результати вимірів від кожного з п'яти детекторів синхронізується та реєструються як від одного комплексного детектора. Наземний сегмент складається з блоку отримання даних від GR-Smart, блоку попередньої обробки, бази даних, блоків робочого та дистанційного контролю, який

через канал радіозв'язку передає команди на сегмент керування польотом та отримує інформацію від нього. Наземний сегмент виконує опрацювання даних, відновлення спектрів радіонуклідів, на основі чого визначаються потужності дози наземного гамма-випромінювання та його якісний склад, координати джерел гамма-випромінювання. Це дозволяє виявити локальні зони радіоактивного випромінювання, побудити контурні карти розподілу гамма-випромінювання на земній поверхні у масштабі 1:10000.

Калібрування підсистеми GR-Smart було виконано на калібрувальному майданчику, розташованому на території Чорнобильської зони відчуження. Для цього спочатку на території майданчика були проведені наземні вимірювання активності наявних радіонуклідів, для яких будуть виконуватись подальші обстеження. Потім з борту БПЛА на висоті 10 м були виміряні інтенсивності гамма-випромінювання та визначені масиви параметрів калібрування. Повітряне гамма-знімання полишених ядерних могильників на території Чорнобильської зони з висоти 30 м зі швидкості 2,8 м/с було успішно виконано [19].

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. У результаті аналізу останніх досліджень і публікацій можна виділити такі особливості систем повітряного гамма-зондування на платформах БПЛА.

Для більш детального дослідження як спектральної роздільної здатності, так і інтенсивності гамма-випромінювання БПЛА потрібно зависати над окремими зонами радіаційного випромінювання [20]. Це не можливо з використанням БПЛА літакового типу. Тому більш перспективними є застосування БПЛА коптерного типу.

Під час повітряного зондування значних інтенсивностей гамма-випромінювання можуть застосовуватись детектори з чутливою речовиною меншого об'єму, а для малих інтенсивностей - меншого об'єму [20]. Взагалі, загальна швидкість рахунку \dot{N} детектора визначається за аналітичною моделлю, яка має вигляд [21]

$$\dot{N} = A\varepsilon \frac{A_D}{4\pi h^2} \exp[-(\mu_a h + \mu_s d)], \quad (1)$$

де A – активність джерела, A_D – площа детектора, ε – пікова ефективність детектора за повною енергією, h – висота детектор над поземною поверхнею, d – глибина залягання джерела, μ_a, μ_s – лінійні коефіцієнти ослаблення для повітря та ґрунту, відповідно. Отже, зміною площі A_D детектора, наприклад, застосуванням діафрагми змінного діаметра, можна регулювати швидкість підрахунку імпульсів, спричинених дією гамма-квантів. Це еквівалентно зміні об'єму чутливої речовини детектора.

Для виконання повітряного гамма-зондування використовуються в основному неколімовані детектори рухливого типу. У таких детекторів поле зору трактується у вигляді кругової області на земній поверхні під літальним апаратом, яка випромінює 90 відсотків від загального виявленого випромінювання [21]. Згідно з даних, наведених у роботі [22], для чутливої речовини детектора у формі кулі чи куба, висоти $h = 20$ м, енергій гамма-випромінювання від 1,5 до 3,0 МеВ, зміни густини повітря від 0,005 м²/кг до 0,001 м²/кг - діаметр поля зору детектора на земній поверхні змінюється з 180 м до 280 м, відповідно. Оскільки названі детектори є позиційно не чутливі, то це веде до спотворення просторової варіації концентрації нуклідів на земній поверхні в межах значного діаметра поля зору детектора [13]. Зі зменшенням висоти БПЛА коло дослідження буде зменшуватись і зменшуватиметься невизначеність у реєстрації просторової варіації концентрації нуклідів.

Математичні моделі, які застосовуються для визначення висотної поправки, містять експоненціальний інтеграл. Він не враховує збільшення кількості розсіяних фотонів, які потрапляють у континуум Комптона. Це зменшує інтенсивність

зарєєстрованого гамма-випромінювання в порівняння з фактичною для приведення зарєєстрованих на борту БПЛА значень інтенсивності наземного гамма-випромінювання до земної поверхні [13].

Ослаблення гамма-випромінювання як функція висоти суттєво впливає на інтенсивність вимірювання. Так, на висоті 40 м інтенсивності гамма-випромінювання зменшується на 50 % [13]. З іншого боку, у випадку значної інтенсивності гамма-випромінювання за низьких висот може виникнути спотворення результатів замірів через ненадійне функціонування електронної апаратури на борту БПЛА в умовах підвищеної радіації.

Отже, у підсумку: зменшення висоти для вимірювання радіаційного фону вимагає низьких висот розташування детектора радіації над об'єктом зондування, а для забезпечення електронного обладнання БПЛА – вищих висот розташування платформи БПЛА.

Досвід застосування картографічної основи вказує на те, що сервіс Google Earth, або ArcGIS Pro не гарантують актуальність відображення елементів та особливостей рельєфу місцевості для району виконання гамма-моніторингу на момент його проведення. Необхідне використання актуальної картографічної основи. Крім того, виникає потреба у відображенні на картографічному матеріалі долин, ярів, балок. У таких місцях радіаційні осадки можуть накопичуватись. Температура повітря у зниженнях рельєфу може бути меншою від температури рівнини чи підвищень. Рослинний покрив і нерівності ґрунту (особливо під косими кутами) вносять додаткове ослаблення гамма-випромінювання [23]. Отже, пониження рельєфу вимагають додаткової уваги з погляду відображення їхньої топографії на картографічних матеріалах. Приведення результатів вимірювань до однакових, стандартних значень параметрів атмосфери потребують вимірювання температури повітря у зниженнях рельєфу.

Для координатного забезпечення повітряного гамма-моніторингу тепер використовуються мережі перманентних GNSS-станцій. Причому використовуються найближчі до району виконання повітряного гамма-моніторингу GNSS-станції. Однак, якщо БПЛА виконують польоти в крутих і вузьких долинах, то зв'язок з базовою GNSS-станцією може бути не настільки надійним, як це зазвичай буває на рівнинній місцевості. Це може ускладнити виконання GPS-позиціонування [13]. Тож виникає потреба в застосуванні GPS-базової станції.

Під час збору гамма-квантів з певною частотою відбувається інтегрування їх кількості за період вимірювання, наприклад 2 с, та усереднення значення. Середнє значення зібраних гамма-квантів, як кількість відліків за секунду та координати присвоюються середині періоду збору [24]. Позиційно точка середини збору за її координатами буде завжди знаходитись на осі маршруту БПЛА, хоча, максимум наземного випромінювання може знаходитись в межі поля зору детектора поза віссю маршруту за період збору. Тому якою б не досконалою була математична основа програми інтерполяції результатів гамма-зондування, кінцеві результати певною мірою наближено відображають варіації концентрації нуклідів на земній поверхні. Тому покращання точності позиціонування та інтенсивності відображення гамма-зондування вимагають уточнення варіації місцеположення максимумів гамма-випромінювання та меж радіаційних плям.

Результати гамма-зондування для картографування радіаційних осадків призначені для прийняття різних управлінських рішень. Це і евакуація людей по найбільш безпечних маршрутах, проведення дезактивації території. Тут до справи повинні долучатися дозиметристи. Користуючись координатною основою повітряного гамма-знімання, його візуалізацією та з використанням GPS-трекерів можна було б прокладати маршрути на місцевості. Однак через підвищений радіаційний фон робота електронної

апаратури може бути ускладнена, а розгортання пунктів дозиметричних вимірювань та прокладання наземних маршрутів потребує затрат часу та додаткового опромінення особового складу дозиметристів. Більш продуктивним було б проводити маркування на деякій віддаленості від наземного радіаційного поля – з борту БПЛА.

Для транспортного засобу з обладнанням системи повітряного моніторингу потрібен прохідний доступ до майданчика розгортання системи. З одного боку, такий майданчик повинен бути поблизу району гамма-зондування – для забезпечення мінімального часу на підліт БПЛА, а з іншого боку, він повинен розташовуватись поза зоною підвищеного радіаційного фону.

Мета статті. Головною метою цієї статті є вдосконалення системи картографування територій радіаційного забруднення на платформі БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Головна ідея вдосконалення системи картографування територій радіаційного забруднення на платформі БПЛА [25] полягає у підвищенні достовірності відображення результатів гамма-зондування. Це досягається створенням актуальної картографічної основи, наближення результатів повітряного гамма-зондування до наземних вимірювань, а також маркування з борту БПЛА зон підвищеного радіаційного фону чи маршрутів більш безпечного пересування по території радіаційного забруднення. До складу системи входить повітряна платформа БПЛА коптерного типу й наземна станція керування, розміщена на транспортному засобі. Склад модульного обладнання СКТРЗ на платформі БПЛА наведено на рис. 1.

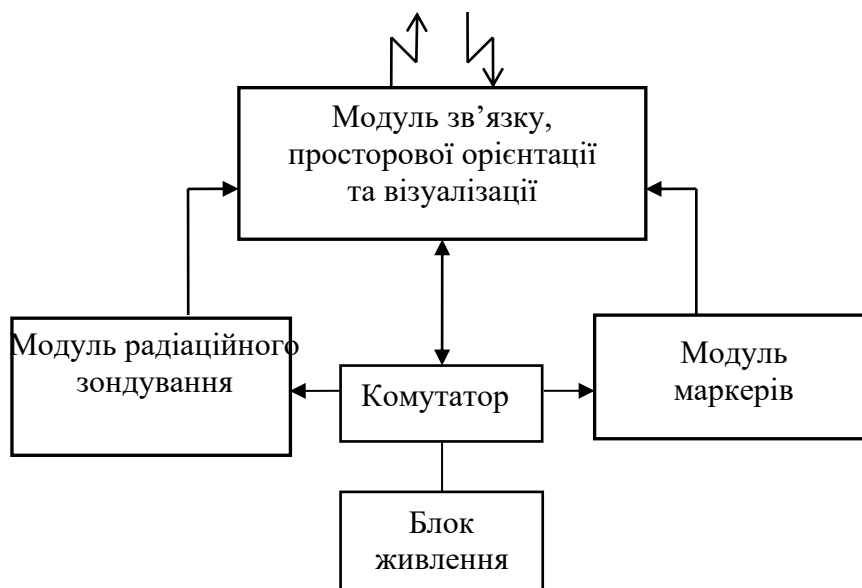


Рис. 1. Склад модульного обладнання СКТРЗ на платформі БПЛА:
 - модуль зв'язку, просторової орієнтації та візуалізації, який містить:
 блок передачі та прийому даних; блок керування польотом; GPS-приймач;
 знімальну камеру на кардановому підвісі; лазерний висотомір; камеру огляду;
 багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП);
 - модуль радіаційного зондування, який містить: механізм регулювання діафрагми
 детектора; детектор гамма-випромінювання; термопару; кабель;
 механізм звільнення кабелю; механізм спуску-підйому детектора;
 лічильник довжини кабелю; двоканальний підсилювач;
 - модуль маркерів, який містить: маркери у вигляді стріли та кульки

Джерело: розроблено авторами.

Детектор гамма-випромінювання разом із механізмом регулювання діаметру діафрагми і термопарою механічно зв'язаний за допомогою кабелю з механізмом звільнення від кабелю, механізмом спуску-підйому детектора та лічильником довжини кабелю. Застосування наведених механізмів дозволяє регулювати розмір вхідної діафрагми детектора гамма-випромінювання, опускати його разом з термопарою на відому висоту відносно земної поверхні, а також відчіплювати механізм регулювання діаметру діафрагми, детектор гамма-випромінювання, термопару разом з кабелем – у разі утримання цих пристроїв місцевими предметами. Блок керування польотом містить систему керування гвинтами, інерційний вимірювальний блок, компас. Для наземного маркування на борту БПЛА розміщується модуль маркерів. Він може бути встановлений замість модуля радіаційного зондування.

Маркери мають вигляд (рис. 2) стріли – для маркування на ґрунтовій поверхні та кулі – для застосування на твердому покритті. Кулі мають еластичні елементи на зовнішній поверхні, що нагадують зовні оболонку каштана. Ці елементи зменшують силу удару об тверде покриття та гальмуватимуть обертовий рух маркеру, що забезпечить незначне відхилення маркеру від точки скидання.

Маркер - стріла



Маркер - куля



Рис. 2. Зовнішній вигляд маркерів [25]

Блок-схему обладнання СКТРЗ на наземному транспортному засобі наведено на рис. 3. Метеорологічне обладнання транспортного засобу містить барометр і термометр. Бокс з джерелом гамма-випромінювання має колімоване джерелом гамма-випромінювання відомої потужності та складу. Модуль маркерів містить комплекти маркерів у вигляді стріли чи кулі. До комплекту детекторів входять запасні детектори гамма-випромінювання з механізмами регулювання діаметра діафрагми, термопарами та електричними кабелями від них.

Гамма-картографування виконується в кілька етапів. Завдання першого етапу полягає у створенні актуальної картографічної основи та виконання розвідки території радіаційного забруднення. Кінцевим результатом першого етапу є ортофотоплан території радіаційного забруднення з зафіксованими на ньому плямами радіаційних опадів. Це дає змогу оцінити масштаби розповсюдження та виконати попередню оцінку ступеня інтенсивності та локалізації гамма-випромінювання. На другому етапі виконується дорозвідка території з уточненням ступеня інтенсивності та місць локалізації гамма-випромінювання. Для цього виконується гамма-зондування з низьких висот з зависанням БПЛА. Результатом цього етапу є уточнення локалізації гамма-випромінювання на ортофотоплані. На третьому етапі виконується маркування з борту БПЛА меж районів із високим рівнем випромінювання, а також можливих маршрутів евакуації персоналу чи населення.

Конкретика реалізації першого етапу полягає в наступному. На територію гамма-зондування з використанням, наприклад сервісу Google Earth, готується план аерофотознімання. План аерофотознімання знаходиться в комп'ютері наземної станції керування. Екіпаж на транспортному засобі виїздить до району ймовірного радіаційного забруднення. До під'їзду в район забруднення вмикається блок живлення наземної станції керування. За командою з персонального комп'ютера включається в роботу автомобільний дозиметр, за показами якого вибирається ділянка місцевості з безпечним радіаційним фоном. Виконується розгортання GPS-базової станції, опрацювання результатів обсервації, передача інформації на персональний комп'ютер наземної станції керування через з'єднання Wi-Fi.



Рис. 3. Блок-схема обладнання СКТРЗ на наземному транспортному засобі [25]

Монтується до злету БПЛА та встановлюється на місцевості бокс із колімованим джерелом гамма-випромінювання та відкривається його верхня частина, що звільнює малопотужне джерело еталонного гамма-випромінювання для випромінювання дотори. За командою з наземної станції керування по каналу радіозв'язку вмикається блок живлення БПЛА. Через комутатор виконується включення в роботу АЦП, блоку керування польотом, камери огляду, GPS-приймача, знімальної камери, механізм регулювання діафрагми детектора, детектора гамма-випромінювання, термопари, двоканального підсилювача сигналів від детектора й термопари, лазерного висотоміра. За командою з наземної станції спостереження БПЛА підіймається в повітря та розташовується над боксом з еталонним джерелом гамма-випромінювання на заданій висоті. При цьому досягається максимальний діаметр діафрагми детектора. За показами лічильника довжини кабелю детектор гамма-випромінювання разом з термопарою опускаються на 1 метр відносно боксу з джерелом еталонного гамма-випромінювання. Вимірюється потужність гамма-випромінювання еталонного джерела та температура повітря. Аналогові сигнали від детектора гамма-випромінювання, термопари підсилюються двоканальним підсилювачем та разом з аналоговими сигналами від знімальної камери, лазерного висотоміра та лічильника довжини кабелю надходять до

багатоканального АЦП. Цифрові сигнали передаються далі каналом зв'язку на наземну станцію та надходять до персонального комп'ютера. Далі, за командою з наземної станції керування, механізм регулювання діафрагми детектора, детектор гамма-випромінювання, термopара підіймається до борту БПЛА, а сам БПЛА переміщується на вищу задану висоту. Виконуються вимірювання інтенсивності еталонного джерела гамма-випромінювання і температури повітря. Покази цих давачів надходять каналом зв'язку до персонального комп'ютера наземної станції спостереження. За результатами вимірювань інтенсивності гамма-випромінювання на двох висотах визначається висотна поправка за технологією, описаною, наприклад, у роботі [18]. Визначається також тиск атмосферного повітря за допомогою метеобладнання, що знаходиться у метеоблоці. Інформація каналами зв'язку передається у закодованому вигляді – для забезпечення інформації від несанкціонованого доступу.

Далі виконується політ БПЛА з точки старту до території радіаційного зондування. За встановленою програмою реалізації місії виконується керування польотом БПЛА через наземний блок керування БПЛА. Сигнали керування передаються каналами зв'язку до БПЛА, надходять через комутатор до блоку керування польотом, GPS-приймача та камери огляду. Камера огляду дозволяє вести спостереження за об'єктами в напрямку польоту. Оперативна інформація стосовно режиму роботи двигунів, системи інерційного вимірювального блоку, компасу, GPS-приймача та відеоінформація надходять каналами зв'язку до персонального комп'ютера наземної станції керування.

Аерознімання території радіаційного забруднення виконується галсами. Періодично та синхронно виконуються зчитування сигналів з детектора гамма-випромінювання, термopари, GPS-приймача та лазерного висотоміра. Також виконується фотографування території знімальною камерою. Інформація від вказаних давачів та відеоінформація передається каналами зв'язку на персональний комп'ютер наземної станції спостереження та фіксується в його пам'яті. Після опрацювання результатів аерознімання та гамма-зондування за допомогою програмних засобів будується цифрова модель місцевості, актуальний оглядовий ортофотоплан. Якщо територія незабудована, то ортофотоплан будується в масштабі 1:5000. Якщо ж територія аерознімання забудована, то ортофотоплан виконується в масштабі 1:2000. Це дає змогу краще ідентифікувати окремі будинки та споруди і елементи місцевості. Крім того, якщо місцевість заліснена, або горбиста чи покрита ярами, балками, то до аерофотознімання долучається LiDAR. Він встановлюється на місце блоку лазерного висотоміра перед виконанням місії. Застосування LiDAR особливо ефективно в зниженнях рельєфу, вкритих, як правило, кущами, рослинністю та в залісненій місцевості. Проникаючі лазерні промені здатні відслідкувати відмітки землі. На ортофотоплані фіксується розподіл потужності дози гамма-випромінювання на земній поверхні, а при необхідності визначається попередній спектральний склад гамма-випромінювання.

Далі реалізується план другого етапу гамма-знімання. На борту БПЛА повинен знаходитись лазерний висотомір. Для отримання більш об'єктивної інформації про радіаційний фон, температуру повітря над долинами, ярами чи балками, дахами жилих будинків виконується гамма-зондування з низьких висот (бажано 1 м над земною поверхнею). Для цього БПЛА зависає над цими об'єктами місцевості. За командою з персонального комп'ютера вмикається механізм спуску-підйому детектора. Відбувається спуск механізму регулювання діаметра діафрагми, детектора гамма-випромінювання і термopари з кабелем, довжина якого визначається лічильником довжини кабелю. Висота БПЛА відносно земної поверхні визначається лазерним висотоміром. За різницею показів лазерного висотоміра та лічильника довжини кабелю визначається висота детектора гамма-випромінювання і термopари над земною поверхнею, а координати

БПЛА визначаються за показами GPS-приймача. Візуальні спостереження ведуться з використанням камери огляду та знімальної камери. Відеоінформація і дані від датчиків передаються каналами зв'язку до персонального комп'ютера. Уточнюється спектральний склад гамма-випромінювання.

Висоти, що використовуються для приведення вимірювання гамма-поля з висоти обсервації h_{obs} до земної поверхні, перетворюються в ефективні висоти для стандартного значення температури 0°C і тиску повітря 101,325 кПа за формулою [26].

$$h_{STR} = \frac{273,15 \cdot P}{101,325 (T + 273,15)} h_{obs}, \quad (2)$$

де h_{obs} – виміряна висота над рівнем землі (метри), T - температура повітря ($^{\circ}\text{C}$), P – тиск повітря (кПа). Значення температури в точках обсервації визначаються за допомогою термометри, тиск - за показами барометра на наземній станції керування. Вимірювання температури з використанням термометри з низьких висот відносно земної поверхні та у зниженнях рельєфу і приведення значення інтенсивностей випромінювання наземного радіаційного поля до одного стандартного значення температури і тиску дозволяє в підсумку точніше охарактеризувати його розподіл.

У разі зачіпання кабелю чи детектора гамма-випромінювання і термометри разом з механізмом регулювання діафрагми детектора місцевими предметами, що не дозволяє виконати підйом цих пристроїв на борт БПЛА, відбувається звільнення кабелю разом з названими пристроями від БПЛА за командою з персонального комп'ютера. Ця подія фіксується за допомогою знімальної камери. БПЛА перериває місію та повертається до наземної станції керування. Тут з комплекту детекторів добуваються механізм регулювання діафрагми детектора, детектор гамма-випромінювання, термометр, які приєднані до кабелю, а сам кабель підключається до роз'ємну, що знаходиться в механізмі звільнення кабелю. БПЛА повертається на місце перерваної місії та продовжує її.

Вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання зі спуском детектора на низьку висоту виконуються і для уточнення місць локалізації плям та максимумів радіаційного випромінювання на основі даних, отриманих на першому етапі гамма-зондування.

У випадку інтенсивного гамма-випромінювання території розвідки, заміри детектором гамма-випромінювання виконуються з максимальною довжиною кабелю – для захисту електронної апаратури БПЛА від радіаційних завад та зі зменшеним діаметром входної діафрагми детектора – для запобігання надзвичайно великої швидкості підрахунку гамма-квантів. Після виконання місії та прибуття БПЛА до району розташування транспортного засобу, виконується калібрування детектора гамма-випромінювання відносно еталонного джерела гамма-випромінювання та введенням поправок у заміри радіаційного фону, виконаного в місцях зі зменшеним діаметром входної діафрагми детектора.

На уточненому ортофотоплані локалізації радіаційного поля відбувається прокладка маршрутів евакуації персоналу чи населення, меж районів із високим рівнем випромінювання. Намічають та визначають координати місць скидів маркерів.

На третьому етапі з борту БПЛА виконується маркування на місцевості меж районів з високим рівнем випромінювання, а також можливих маршрутів евакуації персоналу чи населення. З цією метою модуль радіаційного зондування демонтується з платформи БПЛА, а на його місце встановлюється модуль маркерів, отриманий із транспортного засобу. Така заміна дозволяє збалансувати корисне навантаження та зменшити габаритно-вагові характеристики платформи БПЛА. БПЛА виконує політ до намічених точок скидів маркерів. Над наміченими на ортофотоплані точками БПЛА зависає. Якщо під БПЛА знаходиться ґрунтовий покрив, то виконуються скиди маркерів у вигляді стріли, якщо ж тверде покриття, то маркерів у вигляді кульки.

Звісно, таке навантаження як механізм регулювання діафрагми детектора, механізм спуску-підйому детектора, механізм звільнення від кабелю, лічильник довжини кабелю, сам кабель у підсумку мають значну вагу. Проте, на сьогодні спостерігається швидке покращення технічних характеристик БПЛА. Наприклад, під час ведення бойових дій в Україні використовується важкий гексакоптер «Vampire», який дістав назву «Баба Яга» – за використання в темний час доби та гуркіт від роботи потужних двигунів. Вантажність цього БПЛА зазвичай становить 10...15 кілограмів, хоча деякі модифікації здатні нести до 20 кг і навіть до 25 кг. Розробляються модифікації цього БПЛА, які здатні нести до 150 кг [27].

Висновки. Розроблено нову систему картографування території радіаційного забруднення на платформі БПЛА. Система спрямована на:

- підвищення точності та достовірності результатів гамма-картографування виконанням гамма-зондування з низьких висот відносно земної поверхні та в перетнутій місцевості за наявності механізму спуску-підйому детектора гамма-випромінювання і термопари з борту БПЛА, що наближає результати гамма-зондування до наземних вимірювань;

- застосування модульного компонування, яке дозволяє виконувати заміну модулів на платформі БПЛА залежно від завдань гамма-картографування, що дозволяє зменшити габаритно-вагові характеристики БПЛА;

- створення актуальної картографічної основи у вигляді ортофотоплану в масштабі 1:5000 – для незабудованої території та в масштабі 1:2000 – для забудованої території шляхом аерофотознімання території радіаційного моніторингу під час гамма-зондування;

- зменшення ризику додаткового опромінення особового складу дозиметристів шляхом маркування маршрутів виходу населення та персоналу підприємств з зони підвищеного радіаційного фону та маркування меж цієї зони з борту БПЛА;

- зменшення ймовірності потрапляння екіпажу транспортного засобу в зону підвищеного радіаційного випромінювання за наявності автомобільного дозиметра.

Подальші перспективи досліджень полягають у розробці пропозицій з використання колімованих детекторів гамма-зондування для покращання роздільної здатності гамма-картографування.

Список використаних джерел

1. Burachek, V., Malik, T., Kryachok, S., Bryk, Y., & Belenok, V. (2018). Device for automated leveling. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 5(431), 95-99. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.13>.

2. Наземний дрон для сільського господарства XAG R150. (2022). <https://store.drone.ua/nazemnyi-dron-xag-r150-2022-xauv-revomower/>.

3. Martello, M., Silva, M.L., Silva, C.A.A.C., Rizzo, R., Oliveira, A.K.d.S., & Fiorio, P.R. (2025). Unmanned Aerial Vehicles and Low-Cost Sensors for Monitoring Biophysical Parameters of Sugarcane. *AgriEngineering*, 7 (12), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7120403>

4. Наземні дрони на війні: як роботи змінюють логістику, рятують життя і переносять фронт у XXI століття. (2025). <https://robots.com.ua/nazemni-droni-na-vijni-dosvid-ukraini-u-2022%E2%80%93932025/>.

5. Kalamkar, R. B., Ahire, M. C., Ghadge, P. A., Dhenge, S. A., & Anarase, M. S. (2020). Drone and its Applications in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(6), 3022-3026. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.363>.

6. An, D. H., Kang, Y. S., Park, C. H., Je, G. I., & Ryu, C. S. (2025). Development of Prediction Models for Apple Fruit Diameter and Length Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Multispectral Imagery. *AgriEngineering*, 7 (361), 1-16. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7110361>.

7. Стале відновлення України: внесок БпЛА у цифрову трансформацію лісового господарства. (2023). <https://culver.aero/uk/news/stalie-vidnovliennia-ukrayini-vniesok-bp-la-utsifrovu-transformatsiiu-lisovogho-ghospodarstva>.

8. Ji, Peng, Cheng, Lan, Jia, Yong, & Du, Wenjia. Application of UAV Photogrammetry Technology in Airport Project. (2020). *6th International Conference on Energy Science and Chemical Engineering*, 565, 1-6). Bristol. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012029>.

9. Zatserkovnyi, V.I., Kryachok, S.D., Mamontova, L.S., Popkov, B., & Chepkov, I. Analysis of the accuracy of the orthophoto map building according to aerial photography results executed with UAV. (2020). *XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204332476>.

10. Widodo, S., Abimanyu, A., & Apribr R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series*, 1436, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126>.

11. Gordon, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981>.

12. Grasty, R. L., Richardson, K. A., & Knight, G. B. (1977). Airborne detection of small radioactive sources. *Aerial Techniques for Environmental Monitoring* (pp. 182-192). Las Vegas.

13. Kunze, C., B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, & S. Altfelder. (2022). Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing*, 14 (9), 1-28. <https://doi.org/10.3390/rs14092147>.

14. 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>.

15. Sato Yuki, Ozawa Shingo, Terasaka Yuta, Kaburagi Masaaki, Tanifuji Yuta, Kawabata Kuniaki, Nakamura Miyamura Hiroko, Izumi Ryo, Suzuki Toshikazu, & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(1), 90-96. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211>.

16. Burtniak V., Zabulonov Yu., Stokolos Ma., Bulavin Le., & Krasnoholovet V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chornobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, 12(4), 1-13. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.046007>.

17. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Boyko, O., & Alpert, S. (2023). Improvement of the method of verification of the drift of the gyrovertical on the UAV during aerial photography using the liquid horizon. *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101045>.

18. Min Xiao, Jing Liang, Li Ji, Zheng Sun, & ZeYu Li. (2022). Aerial photography trajectory-tracking controller design for quadrotor UAV. *Measurement and Control* 55(7-8), 738-745. <https://doi.org/10.1177/00202940221115634>.

19. Sergiy Kryachok, Vadym Belenok, Dmytro Liashenko, Liliia Hebryn-Baidy, Roman Tretiak, & Olena Boyko. (2025). Peculiarities of using visualisation systems on UAVs platforms for remote gamma monitoring. *Geodetski list*, 2, 95-118. <https://hrcak.srce.hr/clanak/483606>.

20. Kunze, C., Preugschat, B., Arndt, R., Kandzia, F., Wiens, B., & Altfelder, S. (2022). Development of a AV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sens*. 14(9), 1-28. <https://doi.org/10.3390/rs14092147>.

21. Cresswell, A. J., & D. C. W. Sanderson. (2012). Evaluating Airborne and Ground Based Gamma Spectrometry Methods for Detecting Particulate Radioactivity in the Environment: A Case Study of Irish Sea Beaches. *Science of the Total Environment* 437, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.064>.

22. Duval, Joe S., Cook B., & Adams, A.S. John. (1971). Circle of Investigation of an Airborne Gamma-Ray Spectrometer. *Journal of geophysical Research*, 76(35), 8466-8470.

23. Schwarz, G.F., Rybach, L., Barlocher, C.K., & Klingele, E.E. (1993). Development and Calibration of an Airborne Radiometric Measuring System. In Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. *Proceedings of the Technical Committee Meeting* (9-12). Vienna.

24. Gilmore, G. (2011). *Practical Gamma-Ray Spectroscopy* (2nd edition). Wiley: Chichester. <http://download.e-bookshelf.de/download/0000/7238/17/L-G-0000723817-0002366164.pdf>.

25. Крячок, С. Д., Терещук, О.І. (2025). *Система картографування території радіаційного забруднення* (Патент, України №129110). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=3&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=129110&form-1-param_type=6&form-1-value=КРЯЧОК+СЕРГІЙ+ДМИТРОВИЧ&form-2-param_type=9&form-2-value=СИСТЕМА+КАРТОГРАФУВАННЯ+ТЕРИТОРІЇ+РАДІАЦІЙНОГО+ЗАБРУДНЕННЯ.

26. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363*. (2003). International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf.

27. *Український дрон Баба Яга: що відомо, які переваги та технічні характеристики*. (2024). <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240131-ukrayinskyj-dron-baba-yaga-shho-vidomo-yaki-perevagy-ta-tehnichni-harakterystyky>.

References

1. Burachek, V., Malik, T., Kryachok, S., Bryk, Y., Belenok, V. (2018). Device for automated leveling. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 5(431), 95-99. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.13>.

2. Nazemnyy dron dlya sil's'koho hospodarstva XAG R150 [XAG R150 agricultural ground drone]. (2022). <https://store.drone.ua/nazemnyi-dron-xag-r150-2022-xauv-revomower>.

3. Martello, M., Silva, M.L., Silva, C.A.A.C., Rizzo, R., Oliveira, A.K.d.S., & Fiorio, P.R. (2025). Unmanned Aerial Vehicles and Low-Cost Sensors for Monitoring Biophysical Parameters of Sugarcane. *AgriEngineering*, 7 (12), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7120403>.

4. Nazemni drony na viyni: yak roboty zminyuyut' lohistyku, ryatuyut' zhyttya i perenosyat' front u XXI stolittya [Ground-based drones in warfare: how robots are changing logistics, saving lives, and bringing the front into the 21st century]. (2025). <https://robots.com.ua/nazemni-droni-na-vijni-dosvid-ukraini-u-2022%E2%80%932025>.

5. Kalamkar, R. B., Ahire, M. C., Ghadge, P. A., Dhenge, S. A., Anarase, M. S. (2020). Drone and its Applications in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9 (6), 3022-3026. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.363>.

6. An, D.H., Kang, Y.S., Park, C.H., Je, G.I., Ryu, C.S. (2025). Development of Prediction Models for Apple Fruit Diameter and Length Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Multispectral Imagery. *AgriEngineering*, 7(361), 1-16. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7110361>.

7. Stale vidnovlennya Ukrainy: vnesok BpLA u tsyfrovu transformatsiyu lisovoho hospodarstva. [Sustainable recovery of Ukraine: the contribution of UAVs to the digital transformation of forestry]. (2023). <https://culver.aero/uk/news/stalie-vidnovliennia-ukrayini-vniesok-bp-la-u-tsifrovu-transformatsiyu-lisovogho-ghospodarstva>.

8. Ji, Peng, Cheng, Lan, Jia, Yong, Du, Wenjia. Application of UAV Photogrammetry Technology in Airport Project. (2020). *6th International Conference on Energy Science and Chemical Engineering*, 565, 1-6. Bristol. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012029>.

9. Zatserkovnyi, V.I., Kryachok, S.D., Mamontova, L.S., Popkov, B., Chepkov, I. Analysis of the accuracy of the orthophoto map building according to aerial photography results executed with UAV. (2020). *XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204332476>.

10. Widodo, S., Abimanyu, A., Apribr R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series*, 1436, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126>.

11. Gordon, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981>.

12. Grasty, R. L., Richardson, K. A., & Knight, G. B. (1977). Airborne detection of small radioactive sources. *Aerial Techniques for Environmental Monitoring* (pp. 182-192). Las Vegas.

13. Kunze, C., B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, Altfelder, S. (2022). Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing*, 14 (9), 1-28. <https://doi.org/10.3390/rs14092147>.
14. 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>.
15. Sato Yuki, Ozawa Shingo, Terasaka Yuta, Kaburagi Masaaki, Tanifuji Yuta, Kawabata Kuniaki, Nakamura Miyamura Hiroko, Izumi Ryo, Suzuki Toshikazu, & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(1), 90-96. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211>.
16. 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>.
17. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Boyko, O., Alpert, S. (2023). Improvement of the method of verification of the drift of the gyrovertical on the UAV during aerial photography using the liquid horizon. *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101045>.
18. Min Xiao, Jing Liang, Li Ji, Zheng Sun, ZeYu Li. (2022). Aerial photography trajectory-tracking controller design for quadrotor UAV. *Measurement and Control* 55(7-8), 738-745. <https://doi.org/10.1177/00202940221115634>.
19. Sergiy Kryachok, Vadym Belenok, Dmytro Liashenko, Liliia Hebryn-Baidy, Roman Tretiak, Olena Boyko. (2025). Peculiarities of using visualisation systems on UAVs platforms for remote gamma monitoring. *Geodetski list*, 2, 95-118. <https://hrcak.srce.hr/clanak/483606>.
20. Kunze, C., Preugschat, B., Arndt, R., Kandzia, F., Wiens, B., Altfelder, S. (2022). Development of a AV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sens*. 14(9), 1-28. <https://doi.org/10.3390/rs14092147>.
21. Cresswell, A. J., D. C. W. Sanderson. (2012). Evaluating Airborne and Ground Based Gamma Spectrometry Methods for Detecting Particulate Radioactivity in the Environment: A Case Study of Irish Sea Beaches. *Science of the Total Environment* 437, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.064>.
22. Duval, Joe S., Cook B., Adams, A.S. John. (1971). Circle of Investigation of an Air-borne Gamma-Ray Spectrometer. *Journal of geophysical Research*, 76, (35). 8466-8470.
23. Schwarz, G.F., Rybach, L., Barlocher, C.K., Klingele, E.E. (1993). Development and Calibration of an Airborne Radiometric Measuring System. In Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. *Proceedings of the Technical Committee Meeting* (pp. 9-12). Vienna.
24. Gilmore, G. (2011). Practical Gamma-Ray Spectroscopy (2nd ed). Preprints: Wiley, Chichester. Wiley: Chichester. <http://download.e-bookshelf.de/download/0000/7238/17/L-G-0000723817-0002366164.pdf>.
25. Kryachok, S. D., Tereshchuk, O. I. (2025). Systema kartohrafuvannya terytoriyi radiatsiynoho zabrudnennya [System for mapping the territory of radiation contamination]. (Ukrainian patent, №129110). https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=3&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=129110&form-1-param_type=6&form-1-value=КРЯЧОК+СЕРГІЙ+ДМИТРОВИЧ&form-2-param_type=9&form-2-value=СИСТЕМА+КАРТОГРАФУВАННЯ+ТЕРИТОРІЇ+РАДІАЦІЙНОГО+ЗАБРУДНЕННЯ.
26. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363*. (2003). Vienna: International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf.
27. Ukrayins'kyy dron Baba Yaha: shcho vidomo, yaki perevahy ta tekhnichni kharakterystyky [Ukrainian drone Baba Yaga: what is known, what are the advantages and technical characteristics]. (2024). <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240131-ukrayinskyj-dron-baba-yaga-shho-vidomo-yaki-perevahy-ta-tehnichni-harakterystyky>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

Sergiy Kryachok¹, Oleksiy Tereshchuk²¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: geodesist2015@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>**ResearcherID:** [N-3061-2016](https://www.researcherid.com/rid/N-3061-2016). **SCOPUS Author ID:** [57204332476](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57204332476)²PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olexter1957@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>**ResearcherID:** <http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016>. **SCOPUS Author ID:** [57211315791](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57211315791)**Google Scholar:** https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=ru&user=vZtF4YIAAAAJ
https://scholar.google.com.ua/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk&citsig=AMstHGRJW5NzJv81Vio_Xp9rgjtO_Wm2GA**Index Copernicus:** <http://journals.indexcopernicus.com/+++p24781806.3.ht>**SYSTEM FOR MAPPING AREAS OF RADIATION CONTAMINATION
ON A UAV PLATFORM**

The article addresses the problem of improving radiation-contaminated area mapping using unmanned aerial vehicles (UAVs) as an element of environmental radiation monitoring. The relevance of the research is driven by the growing risks associated with nuclear accidents, damage to nuclear facilities, and the potential release of radioactive materials, which may result in large-scale radioactive contamination. Under such conditions, rapid, accurate, and safe acquisition of spatially referenced radiation data is crucial for decision-making, emergency response, evacuation planning, and mitigation measures.

The study proposes an advanced UAV-based gamma-survey system focused on increasing the reliability and spatial resolution of radiation mapping results. Unlike traditional airborne gamma monitoring using manned aircraft, the proposed approach relies on a multirotor UAV platform capable of low-altitude flights and stationary hovering. This significantly enhances measurement resolution due to reduced flight altitude and speed, while also lowering operational costs and risks to personnel.

A key feature of the proposed system is its modular architecture, which allows flexible replacement of functional units depending on mission objectives. The UAV payload includes a radiation sensing module with a gamma detector equipped with an adjustable aperture and a mechanism for lowering and raising the detector on a cable. This solution makes it possible to perform measurements at very low heights above the ground, bringing airborne gamma-survey data closer to ground-based measurements. Temperature and pressure sensors are integrated into the system to ensure accurate correction of radiation intensity values to standard atmospheric conditions.

Another important component of the system is the creation of an up-to-date cartographic basis using aerial photogrammetry. During gamma surveying, high-resolution aerial images are collected to generate an orthophoto map of the study area at scales of 1:5000 for undeveloped territories and 1:2000 for built-up areas. In complex terrain, such as forested or highly dissected landscapes, LiDAR data acquisition can be additionally employed to improve terrain representation. This approach ensures that radiation data are visualized on an actual and detailed spatial background, accounting for terrain depressions where radioactive fallout may accumulate.

The gamma-survey process is organized in several stages. The first stage includes reconnaissance and generation of an orthophoto map combined with preliminary identification of radiation anomalies. The second stage involves detailed investigation of selected areas using low-altitude hovering and lowered detector measurements to refine the localization and intensity of gamma radiation. The third stage provides physical marking of high-radiation zones and safer evacuation routes directly from the UAV by deploying specially designed ground markers. This solution reduces the need for personnel to enter hazardous areas and minimizes additional radiation exposure.

The proposed system also integrates precise positioning support through the use of a local GNSS base station, improving coordinate accuracy in areas with limited satellite signal reliability, such as narrow valleys or rugged terrain. Overall, the developed methodology increases the accuracy, operational efficiency, and safety of radiation-contaminated area mapping and demonstrates the potential of UAV-based gamma monitoring as an effective tool for emergency response and environmental protection.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); gamma radiation survey; radiation contamination mapping; environmental radiation monitoring; orthophoto map; low-altitude measurements; modular sensing system.

Fig.: 3. References: 27.