

УДК 519.6:504.064

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.2.12>

**Олександр ПОПОВ**

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, виконувач обов'язків директора, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики, Національна академія наук України, професор кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія Управління персоналом», [sasha.popov1982@gmail.com](mailto:sasha.popov1982@gmail.com)  
**ORCID:** 0000-0002-5065-3822

**Андрій ЯЦИШИН**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, виконувач обов'язків завідувача відділу, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики, Національна академія наук України, провідний науковий співробітник, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, Національна академія наук України, [iatsyshyn.andriy@gmail.com](mailto:iatsyshyn.andriy@gmail.com)  
**ORCID:** 0000-0001-5508-7017

**Олег ВЛАСЕНКО**

старший викладач, Державний університет «Житомирська політехніка», [oleg@ztu.edu.ua](mailto:oleg@ztu.edu.ua)  
**ORCID:** 0000-0001-6697-2150

**Андрій КОЦЮБИНСЬКИЙ**

кандидат фізико-математичних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, [Radijrife@gmail.com](mailto:Radijrife@gmail.com)  
**ORCID:** 0000-0003-1135-3568

**Олександр КАНДЗЬОБА**

інженер першої категорії, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, [olexandr.kandzyoba@gmail.com](mailto:olexandr.kandzyoba@gmail.com)  
**ORCID:** 0009-0004-8962-6399

**Дмитро КАТОЛИК**

інженер першої категорії, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, [dmytro.katolyk@gmail.com](mailto:dmytro.katolyk@gmail.com)  
**ORCID:** 0009-0009-7405-5964

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА МОНІТОРИНГУ РАДІАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ В УКРАЇНІ**

**Анотація.** У статті розглядаються перспективи використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для контролю та моніторингу радіаційної обстановки в Україні. Описано сучасні мобільні платформи, їхні переваги та недоліки, а також основні проблеми, що виникають при використанні БПЛА для радіаційного моніторингу. Показано досвід застосування БПЛА під час ліквідації наслідків ядерних аварій. У статті представлено аналіз сучасних технологій детектування іонізуючого випромінювання та наводяться приклади успішного застосування БПЛА для картографування забруднених територій. Крім цього, розглянуто перспективи розвитку радіаційного моніторингу в Україні з використанням БПЛА, підкреслюється необхідність подальших досліджень у цій галузі для забезпечення ефективного управління радіаційними ризиками.

**Ключові слова:** БПЛА, радіаційний моніторинг, детектори.

**Oleksandr POPOV, Andrii IATSYSHYN, Oleh VLASENKO, Andriy KOTSYUBYNSKY, Olexandr KANDZYOBA, Dmytro KATOLYK. PROSPECTS OF USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR RADIATION MONITORING AND CONTROL IN UKRAINE**

**Abstract.** The article explores the prospects of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for radiation monitoring and control in Ukraine. It describes modern mobile platforms, their advantages and disadvantages, and the main challenges faced when using UAVs for radiation monitoring. The article highlights the experience of employing UAVs during the aftermath of nuclear accidents. It provides an analysis of current ionizing radiation detection technologies and presents examples of successful UAV

applications for mapping contaminated areas. Additionally, the article discusses the prospects for the development of radiation monitoring in Ukraine using UAVs, emphasizing the need for further research in this field to ensure effective radiation risk management.

**Key words:** UAV, radiation monitoring, detectors.

### **Актуальність проблеми**

Радіоактивні джерела та матеріали, джерела випромінювання на теперішній час використовуються практично в усіх галузях народно-го господарства. Виготовлені з різних радіонуклідів вони випромінюють різні види іонізуючого випромінювання (альфа- та бета-частинки, гамма-промені, нейтрони), які характеризуються своєю активністю, а саме кількістю розпадів за секунду. Спеціальні ядерні матеріали присутні на різних цивільних і військових об'єктах, а саме в ядерному паливному циклі (ядерні реактори поділу для виробництва електроенергії, виготовлення, переробка та зберігання ядерного палива, тощо), а також у ядерних двигунах (підводні човни та ракети) [1].

За різних негативних обставин (порушення технологічних процесів, техніки безпеки і режиму роботи, техногенні аварії та інциденти, природні явища, диверсії з терористичною метою, бойові дії тощо) на радіаційно-небезпечних об'єктах можуть виникати різні надзвичайні ситуації, які створюють значний ризик для природного середовища, здоров'я персоналу та населення прилеглих територій. Аналіз надзвичайних ситуацій техногенного характеру за загрозою життю людини, за характером дії, за масштабами руйнування будівель, за розміром матеріальних і економічних збитків та ін., показує, що найбільш небезпечними є такі ситуації, які спричиняють радіоактивне та хіміч-не забруднення навколишнього середовища. Як показує сумний досвід аварій на АЕС Три-Майл-Айленд (США, 1979), Чорнобильській АЕС (Україна, 1986), АЕС Фукусіма-1 (Японія, 2011) такі події можуть призводити до значного радіоактивного забруднення, завдавати чималої шкоди здоров'ю населення, природним та агроекологічним системам тощо [2].

Актуальні задачі, які пов'язані з ліквідацією наслідків радіаційних аварій/інцидентів, пошуком джерел іонізуючого випромінювання, картуванням забруднених територій ефективно можна вирішувати за допомогою сучасних мобільних платформ. Важливе місце серед цих платформ займають БПЛА.

### **Виклад основного матеріалу**

#### **Мобільні платформи**

Вибираючи мобільну платформу для розміщення системи визначення джерел іонізуючого випромінювання для конкретного завдання або сценарію, важливо знати, які вимоги необхідно враховувати. До них відносять чутливість транспортного засобу до погодних умов, вантажопідйомність і те, як це впливає на його продуктивність (наприклад, дальність, час роботи), вартість (початкові інвестиції та експлуатаційні витрати), простота експлуатації, легкість дезактивації та досяжний просторовий дозвіл (наприклад, для цілей картографування) [3]. Це все впливає на якість та ефективність вимірювань радіаційного випромінювання. Тому, для правильного вибору мобільної платформи, необхідно знати її переваги та недоліки.

Мобільні платформи можна розділити на наземні та повітряні. Кожна платформа може бути як пілотована, так і безпілотна. У порівнянні з пілотованими наземними транспортними засобами або літаками, безпілотні системи мають ряд переваг, таких як виконання завдань з високим ризиком (наприклад, висока радіація, забруднені території або небезпека вибуху), більш економічно ефективні, а також можливість тривалого обстеження та моніторингу. Залежно від ступеня втручання людини в рішення робота (автономність робота), вони можуть бути повністю дистанційними, напівавтономними або автономними [3].

#### **Повітряні платформи**

Повітряні платформи розділяють на літаки з фіксованим крилом, поворотним крилом (одним гвинтом або кількома гвинтами) і гібридними літаками з вертикальним зльотом і посадкою. Усі ці літаки належать до групи, яка називається платформами важчі за повітря. Іншою важливою групою є платформи легші за повітря, до яких належать повітряні кулі та дирижаблі. Lockheed Martin розробляє гібридний дирижабль, здатний перевозити людей і важкі вантажі, який, як очікується, буде витрачати лише одну десяту палива, що витрачається гелікоптером [4].

**Пілотовані літаки.** Пілотовані літальні апарати (вертольоти та літаки) зазвичай використовуються, коли є необхідність в дослідженнях великої території (наприклад, великомасштабний викид радіоактивного забруднення в навколишнє середовище після ядерної аварії) [5, 6]. Вони також мають більшу вантажопідйомність порівняно з їх безпілотним аналогом, що дозволяє їм транспортувати важкі та об'ємні системи виявлення радіації [6]. Однак пілотовані літаки обмежені мінімальною безпечною висотою, як правило, 152 м над рівнем землі у місцях, де немає заторів [7]. Крім того, відповідна

Продовження таблиці 1

наземна швидкість літака є обмежуючим фактором для вимірювань забруднення землі, враховуючи низьку просторову роздільну здатність. Незважаючи на можливість використання вертольотів для досягнення менших висот, вони також створюють проблему лімітів радіаційного опромінення для екіпажу в умовах високих доз.

**БПЛА.** Значний технологічний ріст розвитку та використання БПЛА для контролю радіаційної обстановки відбувся після інциденту на атомній електростанції Фукусіма-Даїчі у березні 2011 року [6]. Незважаючи на використання лише двох БПЛА (проти семи проти семи безпілотних наземних транспортних засобів) під час надзвичайної ситуації на Фукусіма-Даїчі [8], ця подія відзначила перше використання малої безпілотної авіаційної системи Honeywell T-Hawk [9]. Канальний вентилятор БПЛА з вагою 8 кг було використано для радіологічних досліджень, оцінки структурних пошкоджень та для передбачення видалення уламків.

До переваг безпілотних літаків у порівнянні з іншими безпілотними платформами варто віднести можливість відстеження радіоактивного шлейфу, відбір зразків радіоактивного матеріалу в повітрі, картування опадів великих територій та пошук незахищених джерел, як стаціонарних, так і рухомих.

Літаки з вертикальним зльотом і посадкою мають ряд переваг, оскільки вони можуть зависати і потребують менше місця для запуску та відновлення (не потребують злітно-посадкової смуги). Вони можуть включати мультикоптери/багаторотори, такі як квадрокоптери, гексакоптери або октокоптери (наприклад, квадрокоптери від Microdrones), повітряні роботи (наприклад, Honeywell T-Hawk), гелікоптери з одним гвинтом (наприклад, вертоліт від UAVOS), і гібридний з вертикальним зльотом і посадкою, такий як PD-1 від систем UKR SPEC.

Як зазначено в [1], що незважаючи на великий потенціал цих літаків для радіаційного моніторингу поблизу поверхні, відсутні публікації з використанням гібридних літаків з вертикальним зльотом і посадкою з нерухомим крилом, а також з дирижаблями чи аеростатами. Завдяки можливості зависання та тривалій витривалості (відсутність або низька витрата палива), дирижаблі можна використовувати для моніторингу навколишнього середовища та інспекцій. Прикладом може служити проект автономного безпілотного дистанційного роботизованого дирижабля з дистанційним моніторингом, який досліджував багато аспектів, пов'язаних з динамікою, методами керування та наведення дирижабля [10].

Платформи для вирішення задач контролю радіаційної обстановки. У таблиці 1 наведено короткий огляд переваг та недоліків повітряних платформ. Варто зазначити, що, хоча пілотовані транспортні засоби вимагають, щоб людина, як правило, піддавалася радіологічним ризикам, то безпілотні платформи можуть працювати в парку транспортних засобів, зменшуючи цей ризик для операторів.

Таблиця 1

**Переваги та недоліки платформ для вирішення задач контролю радіаційної обстановки  
[1, 6, 9, 11-16]**

Платформа	Переваги	Недоліки
<i>Наземна, керована людиною</i>		
Автомобіль, фургон або вантажівка	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока просторова роздільна здатність</li> <li>- Висока вантажопідйомність</li> <li>- Експлуатація при несприятливих погодних умовах</li> <li>- Простота в експлуатації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Залежить від існуючої мережі доріг</li> <li>- Більше покриття площі, ніж при пішій розвідці</li> <li>- Ризики дози</li> <li>- Послаблення радіації (конструкція транспортного засобу)</li> <li>- Змінна швидкість (залежить від трафіку)</li> </ul>
Мотоцикл	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока просторова роздільна здатність</li> <li>- Більша гнучкість місцевості (ніж автомобілі)</li> <li>- Менше ослаблення радіації (ніж автомобілі)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Обстеження великої площі</li> <li>- Обмеження корисного навантаження</li> <li>- Ризики дози</li> </ul>
На основі ніг (наприклад, портативний або рюкзак)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Відмінна просторова роздільна здатність</li> <li>- Використовується для підтвердження результатів, отриманих іншими методами радіаційного дослідження</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Дуже тривалий час вимірювання</li> <li>- Обстеження великої території (неможливо)</li> <li>- Ризики дози</li> </ul>

Продовження таблиці 1

Платформа	Переваги	Недоліки
<b>Наземна, безпілотна</b>		
Безпілотний наземний транспортний засіб	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня витривалість</li> <li>- Висока просторова роздільна здатність</li> <li>- Відсутність ризику отримання дози для оператора</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Перешкоди та обмеження місцевості (залежно від типу безпілотного наземного транспортного засобу)</li> <li>- Проблема комунікації</li> </ul>
<b>Повітряне базування, пілотована</b>		
З нерухомим крилом (наприклад, Sky Arrow Aircraft)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня витривалість (6 год і 1110 км)</li> <li>- Висока вантажопідйомність</li> <li>- Швидке розгортання (56 м/с)</li> <li>- Дуже велика площа охоплення</li> <li>- «Галузевий стандарт» для великих вимірювань</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Радіаційне опромінення екіпажу</li> <li>- Висока мінімальна висота польоту</li> <li>- Висока мінімальна швидкість польоту</li> <li>- Погана просторова роздільна здатність</li> <li>- Потрібен пілот</li> <li>- Високі експлуатаційні витрати</li> </ul>
Гелікоптер	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня витривалість (2 год)</li> <li>- Розумний час розгортання</li> <li>- Висока вантажопідйомність (&gt;100 кг)</li> <li>- Вертикальний зліт і посадка</li> <li>- Велика площа покриття</li> <li>- Менші висоти (порівняно з нерухомим крилом)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Радіаційне опромінення екіпажу</li> <li>- Мінімальна висота польоту</li> <li>- Потрібен пілот</li> <li>- Високі експлуатаційні витрати</li> </ul>
<b>Повітряне базування, безпілотна:</b> Загальна характеристика: Відсутність ризику дози для операторів		
З фіксованим крилом (наприклад, БПЛА UARMS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня витривалість (6 год)</li> <li>- Розумний час розгортання (25–35 м/с)</li> <li>- Хороша паливна ефективність</li> <li>- Велика площа покриття</li> <li>- Велика відстань дистанційного керування (100 км)</li> <li>- Низькі витрати</li> <li>- Нижча висота та швидкість, ніж пілотовані фіксовані крила (краща просторова роздільна здатність)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Потрібне більше навчання (ніж багатороторні)</li> <li>- Обмеження корисного навантаження (приблизно 10 кг)</li> <li>- Погодні обмеження (дощ і вітер)</li> <li>- Низькі витрати</li> </ul>
Вертоліт (наприклад, UHMS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня/низька витривалість (90 хв)</li> <li>- Вертикальний зліт і посадка</li> <li>- Нижча висота та швидкість, ніж безпілотні фіксовані крила (краща просторова роздільність.)</li> <li>- Висока маневреність</li> <li>- Низькі експлуатаційні витрати</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Потрібне більше навчання (ніж багатороторні)</li> <li>- Початкові інвестиції</li> <li>У порівнянні з нерухомим крилом має: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Меншу відстань дистанційного керування (3–5 км)</li> <li>- Низьку вантажопідйомність (приблизно 10 кг)</li> <li>- Нижчу максимальну швидкість (довші вимірювання)</li> </ul> </li> </ul>
Багатороторні (дрони)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Низька витривалість (20 хв)</li> <li>- Вертикальний зліт і посадка</li> <li>- Дуже мала висота і швидкість (висока просторова роздільна здатність)</li> <li>- Дуже низькі витрати</li> <li>- Висока маневреність</li> <li>- Простота в експлуатації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Дуже короткий дистанційний режим роботи (&lt;500 м)</li> <li>- Низька вантажопідйомність (кілька кг)</li> <li>- Більші погодні обмеження</li> </ul>
Дирижабль, повітряна куля	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока витривалість (низький витрата палива)</li> <li>- Вертикальний зліт і посадка</li> <li>- Низька вартість експлуатації</li> <li>- Низький рівень вібрації, шуму та турбулентності</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Погана маневреність</li> <li>- Погодні обмеження (умови слабого вітру)</li> <li>- Низька швидкість</li> </ul>
Гібридний літак-дирижабль (наприклад, PLIMP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ті ж переваги, що і дирижабли</li> <li>- Краща маневреність, ніж дирижабли</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Погодні обмеження (умови слабого вітру)</li> <li>- Низька швидкість (але швидше, ніж дирижабли)</li> </ul>
Нерухоме крило з вертикальним злітом і посадкою	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Злітно-посадкова смуга не потрібна</li> <li>- Ті ж переваги, що і з нерухомим крилом</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складна система</li> <li>- Ті ж недоліки, що і у фіксованого крила</li> </ul>



### Проблеми використання БПЛА

Незважаючи на значні переваги використання безпілотних транспортних засобів в задачах радіаційного моніторингу, є ряд проблем, які необхідно вирішувати при їх використанні [17-22].

1. Зв'язок. На БПЛА використовуються електрооптичні мульти- або гіперспектральні камери, засоби для виявлення світла та визначення дальності (LiDAR), мікрорадіодетекції та визначення дальності (RADAR), які передають великий об'єм інформації. Через обмежену пропускну здатність і можливі перешкоди або збій, особливо в операціях «за межами прямої видимості», можуть виникати труднощі зі зв'язком.

2. Автономність. Використання вимірювальних комплексів на основі БПЛА потребує людського нагляду та контролю, особливо в міських районах. Через низьку висоту польоту (0,3–40 м) та близькість до міських споруд (1,5 м) можуть виникати проблеми в автономності їх роботи та навігації. У таких умовах необхідно враховувати п'ять автономних навігаційних можливостей: сканування, уникнення перешкод, слідування за контуром, повернення в задану точку з урахуванням особливостей навколишнього середовища та рух за градієнтом показника дослідження. Крім того, поблизу будівель та інших споруд зменшується покриття супутника GPS. Тому, забезпечення автономності роботи вимірювальних комплексів в складних умовах на сьогодні є складною проблемою.

3. Процес від отримання даних до прийняття рішення. Необхідно покращувати автономний аналіз даних (візуальні та радіаційні дані) для швидкого використання особами, що приймають відповідні рішення.

4. Датчики вимірювання параметрів навколишнього середовища. Необхідні швидкі, дешеві та надійні датчики та пов'язана з ними електроніка для реагування в реальному часі.

5. Живлення. Неперервний час роботи обертаючого двигуна з батарейним живленням може змінюватися в межах 10–60 хв (залежно від корисного навантаження).

6. Погодні умови. У більшості випадків робота БПЛА обмежена несприятливими погодними умовами (опади, вітер, туман, забруднення). В таких обставинах дані, зібрані датчиками, комунікаційними та навігаційними системами, можуть бути пошкоджені або не точними.

7. Нормативно-правові обмеження. Правила безпеки та експлуатаційні процедури необхідні для уникнення зіткнення безпілотників з наземними перешкодами (людьми та спорудами) та іншими літаками.

8. Радіаційні пошкодження. Під час впливу сильних полів радіації термін експлуатації безпілотних платформ обмежений. Це пов'язано з мікроскопічними пошкодженнями, викликаними радіаційною взаємодією з матеріалами платформи. Тому, для виконання запланованих завдань важливо передбачити радіаційні пошкодження в матеріалах і датчиках платформи. Доступні три способи зменшення впливу радіації на критичні компоненти: збільшити відстань до джерела, зменшити час опромінення та/або використовувати захисні матеріали.

9. Шум. На низькій висоті польоту БПЛА створюють значний рівень шуму через обертання пропелерів мультиротора або вібрації планера. Вирішення даної проблеми потребує вдосконалення конструкції дрона та зміни траєкторії польоту.

### Приклади використання БПЛА для вирішення задач контролю радіаційної обстановки

Оскільки безпілотні транспортні засоби можуть використовуватися в забруднених середовищах і небезпечних місцях, їх використання представляє великий інтерес під час радіоактивних і ядерних подій, особливо коли радіаційне поле невідоме (наприклад, аварія або інцидент з радіоактивними речовинами або радіоактивна та ядерна загроза) або існує радіаційних ризик для здоров'я персоналу або населення.

Протягом останнього десятиліття нові технології виявлення випромінювання дозволили використовувати менші та дешевші радіаційні датчики: нові скінтілюючі кристали гамма-випромінювання зі зростаючою ефективністю та кращою роздільною здатністю; нові нейтронні детектори з високою ефективністю і хорошою здатністю розрізняти гамма-промені; датчики, чутливі до нейтронного і гамма-випромінювання; компактні напівпровідникові фотосенсори замість крихких і важких фотопомножувачів; компактні та малопотужні системи збору даних; інструменти, які дозволяють об'єднувати дані кількох радіологічних і нерадіологічних датчиків (контекстні датчики); портативні та легкі гамма-камери та ін. Крім того, заслуговує на увагу зростаючий попит на детектори з малою вагою, низьким споживанням енергії та високою радіаційною стійкістю в аерокосмічній промисловості, зокрема в космічній галузі, де деякі детектори вже були використані [23].

Останні розробки в робототехніці дозволили інтегрувати такі компактні системи виявлення радіації в невеликі безпілотні системи. Використання такої технології за допомогою нових алгоритмів дозволило підвищити надійність виявлення джерела, локалізації та ідентифікації.

Нова ера почалася з першого використання малих безпілотних авіаційних систем у сценарії після аварії на Фукусіма-Даїчі. Незважаючи на нові проблеми, пов'язані з польотами на малій висоті, наприклад, у міських умовах, ризики дози для людей були усунені, і відбулося значне покращення просторової роздільної здатності радіаційного картування порівняно з пілотованими літаками. З тих пір з'явилися нові технології, що передбачають використання недорогих БПЛА для локалізації джерела, картографування і спільної навігації між різними безпілотними платформами.

В роботі [24] реалізовано компактний, легкий і невеликий CZT-детектор, з'єднаний з невеликим багатороторним БПЛА для моніторингу, оцінки та картування радіаційних аномалій. Розроблений інструмент дозволив швидко з такою високою просторовою роздільною здатністю (<1 м) визначити радіонуклідне забруднення навколишнього середовища. Пристрій складається з недорогої, легкої безпілотної літальної платформи з мікроконтролером і вбудованим гамма-спектрометром, GPS і LIDAR. Схоже обладнання (рис. 1, 2) [25] було використано для того, щоб отримати радіаційне картографування з високою роздільною здатністю застарілих уранових шахт, перевірити ефективність різних методів відновлення та дослідити міграцію забруднюючих речовин у сценарії аварії на Фукусіма-Даїчі після катастрофи, включаючи 3D-картографування (за допомогою програмного забезпечення для візуалізації 3D просторових даних). Завдяки льотним характеристикам БПЛА (висота 1-15 м і швидкість 1-1,5 м/с) можна було контролювати висоту інфраструктури, що дозволило вимірювати не тільки радіаційні поля, але й ідентифікувати присутні радіонукліди. Загалом, ця система виявлення продемонструвала такі переваги: низька вартість експлуатації та обслуговування (порівняно з нерухомим крилом), швидке розгортання та виконання автономних завдань. Проте, варто зазначити про деякі обмеження, такі як низька автономність платформи (30–35 хв), сильна погодна залежність, датчики малого об'єму (обмеження корисного навантаження) у порівнянні з висотними платформами з фіксованим крилом.

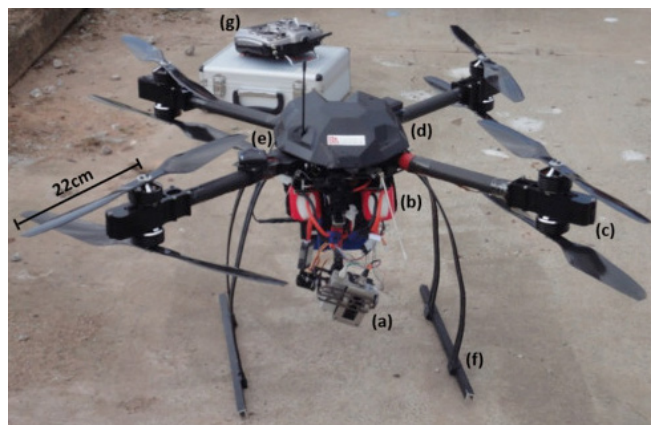


Рис. 1. Фотографія БПЛА, використаного в дослідженні [25]

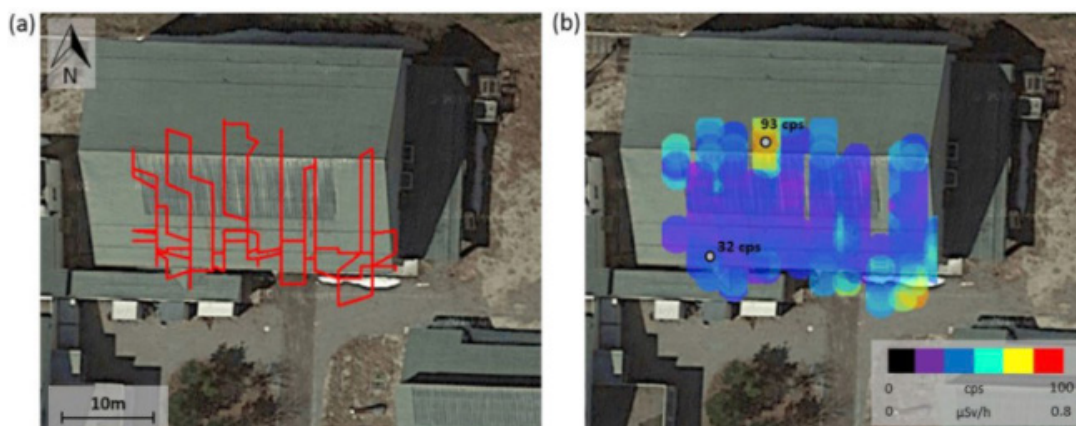


Рис. 2. (a) Маршрут польоту БПЛА над середньою школою Ямакія (місце 2) і (b) Діаграма інтенсивності виявлених рівнів радіації на висоті 1 м над поверхнею [25]

Для планового огляду та обслуговування експериментального термоядерного реактора використовується система дистанційного керування. Виконання цих завдань дуже є трудомістким і дорогим.

В роботі [26] запропоновано використовувати багатороторний БПЛА для виконання базової перевірки, планових перевірок та технічного обслуговування ядерного реактора. Багатообіцяючі результати були отримані у сценарії в приміщенні з використанням слабких джерел. Однак при використанні БПЛА для перевірки термоядерних реакторів (в приміщенні) є деякі обмеження, а саме висока температура та високі потужності дози.

Для відображення високої роздільної здатності на об'єктах радіоактивного матеріалу природного походження, зокрема на виведених з експлуатації уранових шахт, був запропонований легкий гамма-спектрометр, підключений до мультиротора [27]. Автори запропонували використовувати CZT-детектор для сканування області на висоті 5–15 м над рівнем моря та швидкості БПЛА 1,5 м/с.

В публікації [28] представлено проектування, розробку та валідацію безпілотної авіаційної системи для виявлення неконтрольованого та точкового радіоактивного джерела. Авторами описується гнучка і багаторазова архітектура програмного забезпечення для виявлення радіоактивного джерела ( $\text{NaTcO}_4$ , що містить  $^{99m}\text{Tc}$ ). БПЛА оснащений багатоканальним зв'язком для виконання завдань за межами прямої видимості та бортових обчислень для обробки даних у режимі реального часу і реагування на будь-які аномалії, виявлені під час місії (рис. 3). Для правильної інтерпретації радіоактивних проб, відібраних системою, також була розроблена спеціальна наземна диспетчерська станція. Залежно від затримки сигналу, програмне забезпечення RIMASpec (рис. 4) може комутувати між доступними каналами (приватні радіомережі, Wi-Fi і 3G/4G), щоб забезпечити найкращу передачу даних на наземну станцію.

В публікації [29] запропоновано невеликий каналний безпілотною з вентилятором (AVID EDF-8) для розміщення легкого радіаційного датчика (Teviso RD3024—PIN Diode) для визначення гамма- та бета-випромінювання та картування в сценарії ядерної аварійної ситуації. Ця система пройшла випробування і відповідає вимогам теоретичного реагування на ядерну катастрофу. Було підкреслено, що важливим є розроблення алгоритму планування шляху, який міг би змінити пошук мінімальних або максимальних значень дози, наприклад, щоб знайти безпечний шлях для порятунку або знайти гарячі точки.



Рис. 3. Безпілотна літальна платформа з бортовим обчислювальним обладнанням [28]



Рис. 4. Програмне забезпечення RIMASpec Ground Control Station [28]



В дослідженнях чеських учених [30] показано можливість створеного міні-бортового гамма-спектрометричного обладнання з вимірювальною апаратурою на сцинтиляційному гамма-спектрометрі, який був спеціально розроблений для БПЛА, встановлених на потужному гексакоптері (рис. 5). Ця система досліджувала аномалії урану поблизу села Тршебсько (Чеська Республіка). Спектрометр гамма-променів мав два сцинтиляційних детектора BGO ємністю  $103 \text{ cm}^3$  відносно високої чутливості. Випробовувана аномалія розміром  $80 \text{ m}$  на  $40 \text{ m}$  була досліджена методом наземного гамма-спектрометричного вимірювання в детальній прямокутній вимірювальній сітці. Міні-повітряні вимірювання поперек аномалії проводилися на трьох паралельних профілях довжиною  $100 \text{ m}$  на восьми висотах польоту від  $5$  до  $40 \text{ m}$  над землею (рис. 6).



Рис. 5. Міні-бортовий гамма-спектрометричний прилад у польоті [30]

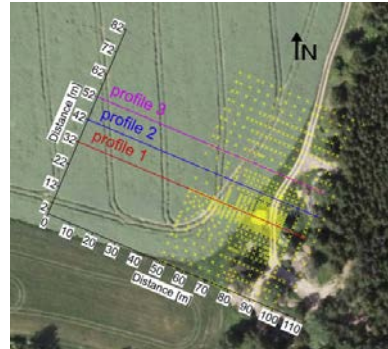


Рис. 6. Ортофото полігону Тршебско [30]

Науковцями [13] розроблено апаратно-програмне забезпечення для виявлення та підрахунку місць проміжної локалізації радіоактивних відходів для оцінки необхідності та доцільності їх перепохонання. На базі БПЛА створена автоматизована система швидкого реагування для радіаційного контролю та моніторингу навколишнього середовища. Показано, що використання запропонованої системи дозволяє виявляти як точкові, так і розподілені джерела радіоактивного забруднення в реальних умовах. На основі кількості імпульсів у каналі Cs-137 отримано просторовий розподіл гамма-випромінювання. На рис. 7 показано виявлене радіоактивне забруднення вздовж маршрутів БПЛА ділянки Піщаного плато зони відчуження Чорнобильської АЕС, включаючи зону забруднення шириною  $20 \text{ m}$  вздовж маршруту БПЛА без інтерполяції.

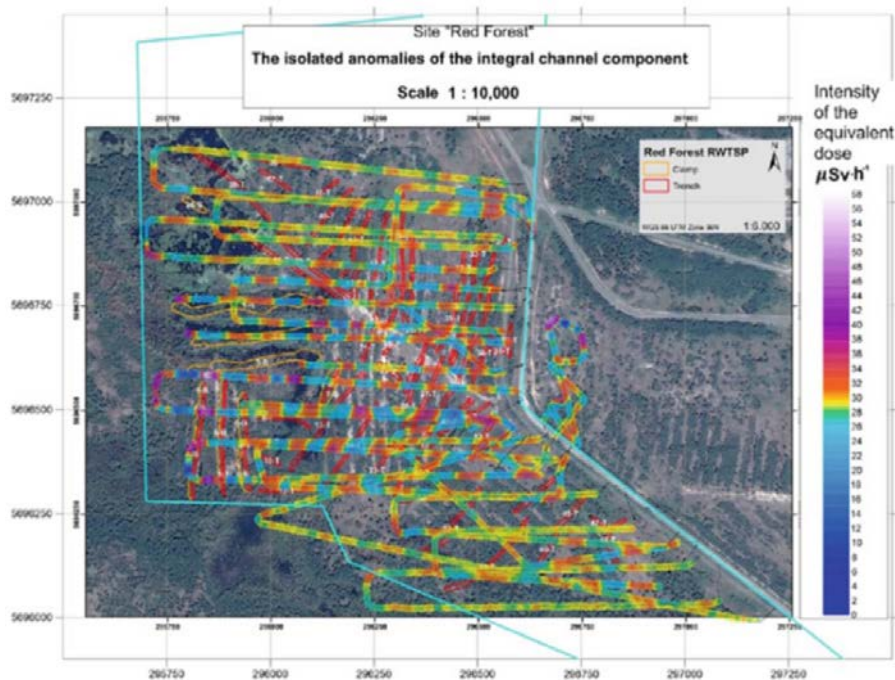


Рис. 7. Радіоактивне забруднення, яке виявлено за допомогою БПЛА [13]



### **Перспективи розвитку радіаційного моніторингу України на базі БПЛА**

Для контролю та оцінки радіоактивності навколишнього природного середовища, отримання інформації про його радіаційний стан на території України функціонує система радіаційного моніторингу, в якій використовують стаціонарні пости, пересувні лабораторії і практикують ручний відбір проб.

Однак, як показує практика, така система є малоефективною для вирішення таких важливих завдань [15, 31, 32], як оперативне здійснення радіаційної розвідки території великої площі; оцінювання радіаційної обстановки на територіях зі складним рельєфом та важкопрохідною рослинністю, а також у зруйнованих, аварійних або замінованих радіаційно небезпечних об'єктах; оперативне отримання необхідної інформації в режимі реального часу з місця надзвичайної ситуації з радіаційним фактором ураження. При цьому необхідною є фізична участь людини у відборі проб, що створює істотний ризик для її здоров'я в умовах значного рівня радіації на досліджуваній території. Тому для вирішення подібних завдань ефективними є дистанційні методи на базі БПЛА.

Територія зони відчуження Чорнобильської АЕС з 24 лютого 2002 року по 31 березня 2022 року перебувала під окупацією військ РФ. У цей період окупаційними військами проводилися масштабні земляні роботи, здійснювалося переміщення важкої техніки, створюючи значні додаткові радіаційні ризики. Також відбулось винесення радіоактивності за межі зони на колесах та броні тисяч одиниць важкої воєнної та інженерної техніки, масштаб якого складно оцінити. Лише у період окупації через бойові дії у зоні відчуження було зафіксовано понад 30 пожеж. Така негативна ситуація призвела до того, що відбувся перерозподіл радіонуклідів в компонентах довкілля зони відчуження та суміжних територій. Тому для оцінювання такого перерозподілу радіонуклідів, а також підвищення ефективності радіаційного моніторингу України необхідно використовувати апаратно-програмні комплекси на базі БПЛА. Проте варто зазначити, що вченим ще необхідно працювати над: зменшенням габаритів та маси вимірювальне обладнання, що значно зменшує час польоту, маневреність, обсяг отримуваної інформації з території дослідження; пошуком можливостей виявляти на земній поверхні та в товщі ґрунту радіоактивні джерела з нефіксованою геометрією та невідомим ізотопним складом; пошуком можливостей визначати з високою просторовою роздільною здатністю щільність поверхневого радіаційного забруднення територій та ідентифікувати його ізотопний склад тощо. Вирішення цих задач також дозволить здійснювати вимірювання рівня радіоактивного забруднення в польових умовах, оскільки таке забруднення є випадковим, поширюється у разі як високої, так і низької активності і характеризується нефіксованою геометрією. Розвиток таких апаратно-програмних комплексів на базі БПЛА відповідає стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу України на період до 2024 року і є важливим кроком до досягнення цілей сталого розвитку та підвищення рівня національної безпеки.

#### **Висновки**

У випадках, коли радіаційне поле невідоме, гарною альтернативою пілотованим транспортним засобам є безпілотні системи. Безпілотний наземний транспортний засіб можна використовувати для перевезення важких корисних вантажів, проте у цих засобів можуть виникати проблеми комунікації (наприклад, всередині будівель) і вони обмежені перешкодами та місцевістю. БПЛА можуть долати перешкоди на землі, можуть бути розгорнуті та швидше летіти до місцевості, а також виконувати більші дослідження на менших висотах і на менших швидкостях (покращена просторова роздільна здатність порівняно з пілотованими літаками). Через їхню високу маневреність БПЛА, як правило, є кращим варіантом для виконання вимірювань у міських районах або в закритих приміщеннях.

БПЛА можуть використовуватися як автономні платформи для пом'якшення наслідків ядерної аварії, пошуку радіоактивних джерел та картування забруднених територій. БПЛА з фіксованим крилом можна використовувати для швидких досліджень, проте ці платформи зазвичай вимагають більш високої активності джерела (щоб їх виявити) і потребують злітно-посадкової смуги.

Особливими складними умовами для безпілотних транспортних засобів, зокрема БПЛА, є міські райони та закриті приміщення. Ці середовища характеризуються проблемами навігації (збій GPS) і зв'язку (втрата з'єднання або затримка контрольного сигналу), можливими зіткненнями з інфраструктурою/людьми чи іншими маловисотними літаками (на вулиці) та шумом.

Несприятливі погодні умови (наприклад, опади, вітер, туман, забруднення) сильно впливають на вимірювання рівня радіаційного забруднення. Міські райони є складним середовищем (наприклад, різні конструкційні матеріали) і створюють багато проблем з точки зору доступу транспортних засобів, екранування та можливості приховування джерел, комунікацій тощо. Оцінювання активності радіоактивних джерел може бути складною для мобільних систем детектування, оскільки, як правило, невідомо їх геометрія; відсутня інформація про екрануючий матеріал між детектором і джерелом.

Використання БПЛА для вирішення задач радіоекологічного моніторингу відкриває нові можливості при дослідженні радіаційно-небезпечних об'єктів, а у випадку надзвичайних ситуацій, які пов'язані

з радіаційним фактором ураження, дозволяє за мінімальний проміжок часу приймати швидкі ефективні управлінські рішення щодо забезпечення необхідного рівня захисту населення та навколишнього середовища, мінімізації масштабів ураження, повної ліквідації відповідних наслідків.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на: розроблення нових вимірювальних (детектуючих) систем на основі штучного інтелекту для різних сценаріїв радіоактивних чи ядерних ситуацій; забезпечення автономності та довготривалості роботи; розроблення програмного забезпечення для швидкого аналізу отриманих даних та засобів для підвищення точності виявлення радіоактивного джерела, його локалізації і ідентифікації; використання малогабаритних багатofункціональних датчиків.

#### Список використаних джерел:

1. Marques L., Vale A., Vaz P. State-of-the-art mobile radiation detection systems for different scenarios. *Sensors*. 2021. Vol. 21(4). 1051. URL: <https://doi.org/10.3390/s21041051>
2. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T., Matvieieva I. Analysis of Possible Causes of NPP Emergencies to Minimize Risk of Their Occurrence. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. Vol. 1(81). P. 75–80. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).13](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).13)
3. Schneider F. E., Gaspers B., Peräjärvi K., Gårdestig M. Current state of the art of unmanned systems with potential to be used for radiation measurements and sampling: ERNCIP Thematic Group Radiological and Nuclear Threats to Critical Infrastructure Task 3 Deliverable 1. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. 63 p.
4. Lockheed Martin. URL: <https://www.lockheedmartin.com>
5. Martin P. G., Hutson C., Payne L., Connor D., Payton O. D., Yamashiki Y., Scott T. B. Validation of a novel radiation mapping platform for the reduction of operator-induced shielding effects. *Journal of Radiological Protection*. 2018. Vol. 38(3). P. 1097–1110. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aad5f2>
6. Connor D. T., Wood K., Martin P. G., Goren S., Megson-Smith D., Verbelen Y., Chyzhevskiy I., Kirieiev S., Smith N. T., Richardson T., Scott T. B. Radiological Mapping of Post-Disaster Nuclear Environments Using Fixed-Wing Unmanned Aerial Systems: A Study from Chernobyl. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00149>
7. Stöcker C., Bennett R., Nex F., Gerke M., Zevenbergen J. Review of the Current State of UAV Regulations. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9(5). 459. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9050459>
8. Murphy R. R. *Disaster Robotics*. MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2014.
9. Duncan B. A., Murphy R. R. Autonomous Capabilities for Small Unmanned Aerial Systems Conducting Radiological Response: Findings from a High-fidelity Discovery Experiment. *Journal of Field Robotics*, 2014. Vol. 31(4) P. 522–536. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21503>
10. Lowdon M., Martin P. G., Hubbard M. W. J., Taggart M. P., Connor D. T., Verbelen Y., Sellin P. J., Scott T. B. Evaluation of Scintillator Detection Materials for Application within Airborne Environmental Radiation Monitoring. *Sensors*. 2019. Vol. 19(18). 3828. URL: <https://doi.org/10.3390/s19183828>
11. Lowdon M., Martin P. G., Hubbard M. W. J., Taggart M. P., Connor D. T., Verbelen Y., Sellin P. J., Scott T. B. Evaluation of Scintillator Detection Materials for Application within Airborne Environmental Radiation Monitoring. *Sensors*. 2019. Vol. 19(18). 3828. URL: <https://doi.org/10.3390/s19183828>
12. Elfes A., Siqueira Bueno S., Bergerman M., Ramos J. G. A semi-autonomous robotic airship for environmental monitoring missions. In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation: Leuven, Belgium: IEEE, 1998. P. 3449–3455.
13. Zabulonov Y., Popov O., Burtiak V., Iatsyshyn A., Kovach V., Iatsyshyn A. Innovative Developments to Solve Major Aspects of Environmental and Radiation Safety of Ukraine. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. P. 273–292. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_16)
14. Popular Science. URL: <https://www.popsci.com/plimp-plane-blimp-drone/>
15. Popov O., Bondar O., Ivaschenko T., Puhach O., Iatsyshyn A., Skurativskiy S. Features of the Modern UAV-Based Complexes Use to Solve Radiation Control Problems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. P. 35–57. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_3)
16. Sanada Y., Orita T., Torii T. Temporal variation of dose rate distribution around the Fukushima Daiichi nuclear power station using unmanned helicopter. *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. Vol. 118. P. 308–316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.09.008>
17. Watkins S., Burry J., Mohamed A., Marino M., Prudden S., Fisher A., Kloet N., Jakobi T., Clothier R. Ten questions concerning the use of drones in urban environments. *Building and Environment*. 2020. Vol. 167. 106458. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106458>
18. Scanlan J., Sobester A., Flynn D., Lane D., Richardson R., Richardson T. *Extreme Environments Robotics: Robotics for Emergency Response, Disaster Relief and Resilience*, 1st ed. UKRAS White Paper. London: UK-RAS Network, 2017. 18 p.
19. Duncan B. A., Murphy R. R. Autonomous Capabilities for Small Unmanned Aerial Systems Conducting Radiological Response: Findings from a High-fidelity Discovery Experiment. *Journal of Field Robotics*. 2014. Vol. 31(4). P. 522–536. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21503>
20. Iqbal J., Tahir A. M., ul Islam R., Riaz-un-Nabi. Robotics for nuclear power plants—Challenges and future perspectives. In Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), Zurich, Switzerland, 2012. P. 151–156.
21. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T., Koyanagi E., Fukushima M., Kawatsuma S. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *Journal of Field Robotics*. 2012. Vol. 30(1). P. 44–63. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21439>

22. Kazemeini M., Vaz J. C., Barzilov A. Study of radiation effects in electronics of a hexapod robotic platform. In Proceedings of the AIP Conference Proceedings 2160, 12-17 August 2018, Grapevine, Texas, USA (American Institute of Physics), 2019. P. 060003-1-060003-6.
23. Berger T., Marsalek K., Aeckerlein J., Hauslage J., Matthiä D., Przybyla B., Rohde M., Wirtz M. The German Aerospace Center M-42 radiation detector—A new development for applications in mixed radiation fields. *Review of Scientific Instruments*. 2019. Vol. 90(12). 125115. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5122301>
24. MacFarlane J. W., Payton O. D., Keatley A. C., Scott G. P. T., Pullin H., Crane R. A., Smilion M., Popescu I., Curlea V., Scott T. B. Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 136. P. 127–130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.008>
25. Martin, P. G., Kwong, S., Smith, N. T., Yamashiki, Y., Payton, O. D., Russell-Pavier, F. S., Fardoulis, J. S., Richards, D. A., & Scott, T. B. 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. Vol. 52. P. 12–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.05.007>
26. Vale A., Ventura R., Carvalho P. Application of unmanned aerial vehicles for radiological inspection. *Fusion Engineering and Design*. 2017. Vol. 124. P. 492–495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.06.002>
27. Borbinha J., Romanets Y., Teles P., Corisco J., Vaz P., Carvalho D., Brouwer Y., Luís R., Pinto L., Vale A., Ventura R., Areias B., Reis A. B., Gonçalves B. Performance Analysis of Geiger–Müller and Cadmium Zinc Telluride Sensors Envisaging Airborne Radiological Monitoring in NORM Sites. *Sensors*. 2020. Vol. 20(5). 1538. URL: <https://doi.org/10.3390/s20051538>
28. Royo P., Pastor E., Macias M., Cuadrado R., Barrado C., Vargas A. An Unmanned Aircraft System to Detect a Radiological Point Source Using RIMA Software Architecture. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10(11). 1712. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10111712>
29. Cai C., Carter B., Srivastava M., Tsung J., Vahedi-Faridi J., Wiley C. Designing a radiation sensing UAV system. 2016 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS). 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/sieds.2016.7489292>
30. Šálek O., Matolín M., Gryc L. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 182. P. 101–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.033>
31. Lüley J., Vrban B., Čerba Š., Osuský F., Nečas V. Unmanned Radiation Monitoring System. *EPJ Web of Conferences*. 2020. Vol. 225. 08008. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508008>
32. Попов О. О. Нові підходи до радіаційного моніторингу забруднених територій на базі БПЛА. *Вісник Національної академії наук України*. 2024. Вип. 5. С. 58–61. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2024.05.058>