

С. А. Станкевич¹, Т. В. Дудар²,
Г. Д. Коваленко³, В. В. Карташов³

¹ Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАНУ, м. Київ, Україна

² Національний авіаційний університет Міністерства освіти та науки, м. Київ, Україна

³ Український науково-дослідний інститут екологічних проблем Міністерства екології та природних ресурсів, м. Харків, Україна

Повітряний інфрачервоний моніторинг об'єктів ядерного паливного циклу в Україні

Розглядається можливість застосування повітряного інфрачервоного моніторингу об'єктів ядерного паливного циклу, зокрема в Україні, на прикладі сухого сховища відпрацьованого ядерного палива Запорізької атомної електростанції. Впровадження інфрачервоного аерознімання забезпечує додаткову інформацію про стан об'єктів моніторингу, засновану на принципово інших фізичних принципах, ніж в існуючих системах. Представлено моделі застосування та технічні вимоги до сучасних зразків інфрачервоної знімальної апаратури та її малогабаритних безпілотних носіїв.

Ключові слова: ядерний паливний цикл, повітряний моніторинг, безпілотний літальний апарат, інфрачервоний радіометр.

С. А. Станкевич, Т. В. Дудар, Г. Д. Коваленко, В. В. Карташов

Воздушный инфракрасный мониторинг объектов ядерного топливного цикла в Украине

Рассматривается возможность применения воздушного инфракрасного мониторинга объектов ядерного топливного цикла, в частности в Украине, на примере сухого хранилища отработанного ядерного топлива Запорожской атомной электростанции. Внедрение инфракрасной аэрозъемки дает дополнительную информацию о состоянии объекта мониторинга, основанную на принципиально других физических принципах, чем в существующих системах. Представлены модели применения и технические требования к современным образцам инфракрасной съёмочной аппаратуры и ее малогабаритных беспилотных носителей.

Ключевые слова: ядерный топливный цикл, воздушный мониторинг, беспилотный летательный аппарат, инфракрасный радиометр.

© С. А. Станкевич, Т. В. Дудар, Г. Д. Коваленко, В. В. Карташов, 2015

Об'єкти ядерного паливного циклу (ОЯПЦ) розташовані на територіях різних країн світу. Тому система міжнародної ядерної безпеки, розроблена Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) в системі ООН, спрямована перш за все на управління ядерним паливним циклом (ЯПЦ). Відповідно до правил міжнародної ядерної безпеки, країни, що мають на своїй території ОЯПЦ, повинні надавати звіти до МАГАТЕ про відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) і місця його зберігання, а також забезпечувати доступ інспекторам МАГАТЕ для огляду ядерних об'єктів і місць зберігання ядерного палива (ЯП). МАГАТЕ і міжнародна спільнота керуються при цьому Конвенцією про допомогу на випадок ядерної аварії або радіаційної аварійної ситуації (1986), Конвенцією про оперативне оповіщення про ядерну аварію (1986), Конвенцією про фізичний захист ядерного матеріалу (1987), Конвенцією про ядерну безпеку (1994), Об'єднаною конвенцією про безпечне поводження з відпрацьованим паливом і про безпеку поводження з радіоактивними відходами (1997).

У зв'язку з широким розповсюдженням ядерних реакторів і створенням нових дослідницьких реакторів підвищується відповідальність МАГАТЕ у сфері ядерної безпеки, а також збільшується увага громадськості до питань безпеки.

Замкнений ядерно-паливний цикл складається з процесів видобутку, переробки уранової руди, збагачення ядерного палива ураном-235, виготовлення паливних елементів, виробництва енергії в ядерних реакторах, переробки відпрацьованого ядерного палива і поховання радіоактивних відходів [1, 2].

В Україні на ОЯПЦ реалізовано три процеси: видобуток, переробка уранової руди та виробництво електроенергії на атомних станціях з відкладеним рішенням переробки ВЯП на 30–40 років.

У країнах з ядерною енергетикою питання екологічного, економічного, радіаційного моніторингу, обліку та контролю ядерних матеріалів є надзвичайно актуальними [3]. У створенні сучасних інформаційних систем забезпечення безпеки та моніторингу підприємства ЯПЦ відстають порівняно з аналогічними роботами, які проводяться на АЕС. Відставання часто обумовлено об'єктивними причинами, зокрема складністю й унікальністю різноманітних технологічних процесів у ЯПЦ, широким спектром використовуваних матеріалів. Водночас вони мають велику кількість високоактивних матеріалів, і наслідки потенційних аварій на них можуть бути порівнянними з наслідками аварій на АЕС [4].

Постановка завдання. Під удосконаленням системи управління безпекою в ЯПЦ розуміється реалізація комплексу заходів щодо створення технічних засобів забезпечення моніторингу стану безпеки на ОЯПЦ у реальному масштабі часу. На підприємствах ЯПЦ функціонують інформаційно-вимірвальні системи різного рівня автоматизації, в регламентах і спеціальних документах відображено основні аварійні ситуації, причини їхнього виникнення та можливості ліквідації. Проте ці дані не систематизовано, а громадськість інформується неналежним чином, що негативно впливає на імідж галузі та ставлення людей до неї.

Під моніторингом безпеки процесів розуміється процедура отримання інформації в реальному масштабі часу про стан об'єктів у цілому (нормальний, з небезпечними відхиленнями, аварійний), її обробка й передавання на підприємства для прийняття рішень. Метою моніторингу є якомога раннє виявлення небезпечного відхилення або аварійного стану окремих вузлів і об'єктів

у цілому, ідентифікація джерела небезпеки та інформування про це галузевих органів управління [5].

Існуючі методи радіаційного моніторингу фіксують подію, що вже відбулася, і не здатні виявити перед аварійний стан об'єкта. Тому пропонується розробити тип моніторингу на основі фізичних принципів, чутливих до підвищення температури (тип інфрачервоного моніторингу), що уможливить передчасне виявлення ймовірного руйнування захисних бар'єрів на підприємствах ЯПЦ і своєчасне запобігання надходженню радіоактивних речовин у довкілля.

Об'єкти авіаційного інфрачервоного моніторингу. Першим об'єктом, на якому розглядається відпрацьовування інфрачервоного моніторингу із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), є сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) Запорізької атомної електростанції (ЗАЕС). На ЗАЕС обрано систему проміжного зберігання відпрацьованих тепловидільних збірок (ВТВЗ) у бетонних контейнерах. Із зберіганням ВТВЗ у басейні витримки

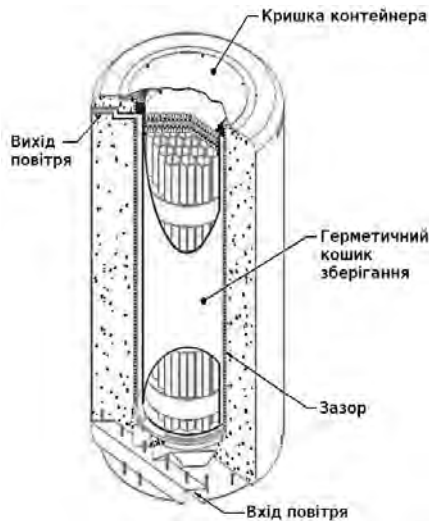


Рис. 1. Схема контейнера для сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива

протягом 3—5 років залишкове тепловиділення й радіоактивність палива значно знижуються. Таке паливо можна безпечно зберігати сухим способом у спеціальних контейнерах, що забезпечують ефективне тепловідведення з ВТВЗ і достатній біологічний захист. Контейнери встановлені на бетонному майданчику і мають пасивну вентиляцію [6]. 24 ВТВЗ зберігаються у шестиграних трубних чохлах, що розташовані в циліндричному багатомісному герметичному кошику зберігання (рис. 1). Кошик є другим захисним бар'єром (перший захисний бар'єр — оболонка твела), який запобігає виходу радіоактивності до навколишнього середовища за малоімовірного випадку порушення цілності першого захисного бар'єра. Багатомісний кошик є також і радіатором, який відводить надлишкове тепло ВТВЗ в об'єм бетонного захисного контейнера, що вентилюється. Заповнення кошика гелієм створює й підтримує протягом всього зберігання ВТВЗ інертне середовище, що передає тепло. Бетонний контейнер є опорною конструкцією, яка забезпечує захист від випромінювання, а також повітряне охолодження кошика на час зберігання у ССВЯП. Шлях повітряного потоку утворюється каналами для входження повітря, повітрязабірниками, циліндричним зазором між оболонкою кошика і внутрішнім облицюванням бетонного контейнера, а також каналами для виходу повітря.

На рис.2 наведено супутниковий знімок (08.11.2013) з розташуванням ССВЯП біля ЗАЕС. На знімку видно, що майданчик заповнено приблизно на чверть, на ньому розташовано 103 контейнери з ВЯП.

За кліматичною класифікацією район ССВЯП розташований у Чорноморській атлантико-континентальній степовій області. Середньорічна температура становить 9,2 °С, абсолютний максимум сягав 39—40 °С, абсолютний мінімум — мінус 33—34 °С.

Розрахункові дослідження теплового стану ВТВЗ під час їх зберігання у контейнерах, що встановлені на майданчику ССВЯП, мають такі температурні характеристики на виході з системи вентиляції:

за нормальних умов експлуатації (температура атмосферного повітря 24 °С) $t_{\text{вих}} = 73$ °С;

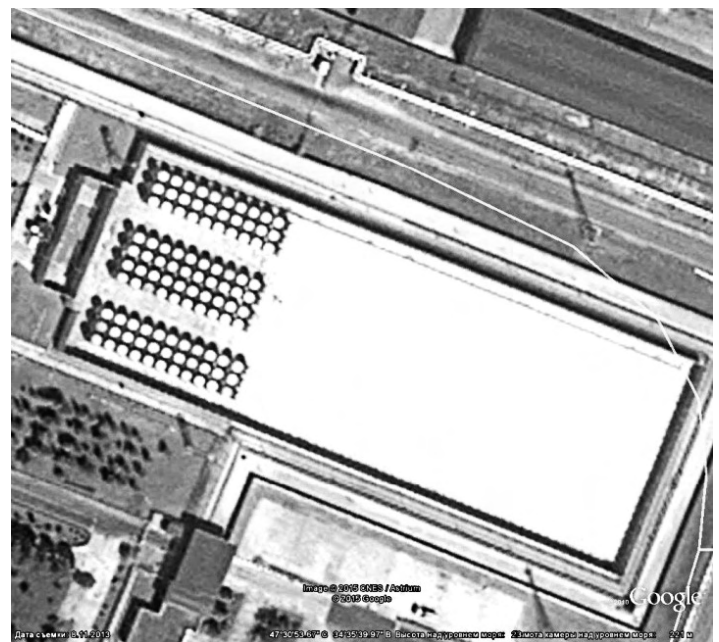
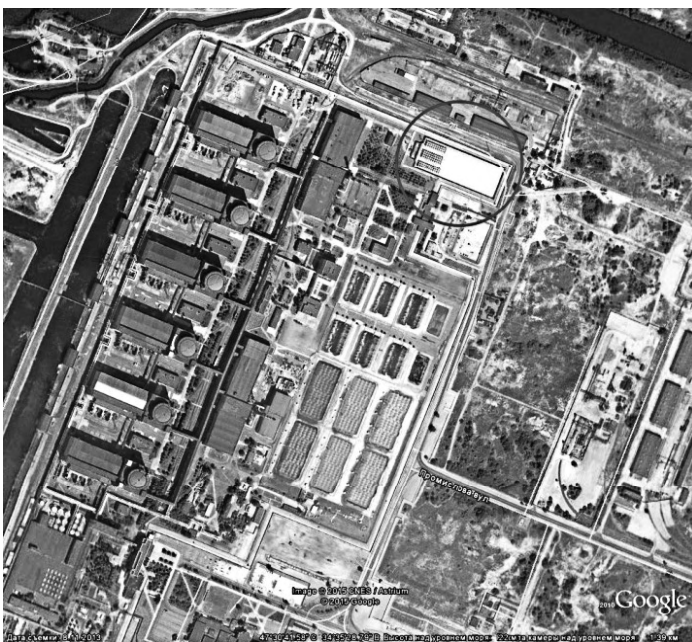


Рис. 2. Розташування ССВЯП біля ЗАЕС



Рис. 3. Сучасні мультикоптери, що виготовляються серійно:
 а — DFI Draganflyer X6, б — KWA Droidworx CX4, в — DJI Nighthawk P2 T, г — HiSystems Okto 6S

за умов порушення нормальних умов експлуатації (температура атмосферного повітря в абсолютному максимумі — плюс 40 °C) $t_{\text{вих}} = 89$ °C;

за умов порушення нормальних умов експлуатації (температура атмосферного повітря в абсолютному мінімумі — мінус 40 °C) $t_{\text{вих}} = -1$ °C.

Як показав досвід експлуатації подібних сховищ, більша частина проблем безпеки обумовлена утворенням «подушок» з атомарного водню, які можуть призвести до вибуху, розгерметизації контейнера та викиду радіоактивних речовин у довкілля за умов підвищення температури. За допомогою інфрачервоного моніторингу можна своєчасно виявляти змінення температурного режиму, що слугуватиме додатковим заходом для безпечної експлуатації ССВЯП.

Вибір носія інфрачервоної знімальної апаратури. Останнім часом малогабаритні БПЛА все більше застосовуються в повітряному моніторингу різноманітних об'єктів, зокрема в інтересах попередження надзвичайних ситуацій. Основними вимогами, що висуваються до авіаційного носія апаратури спостереження в таких випадках, є оперативність та інформативність моніторингу. БПЛА вертикального зльоту і посадки забезпечують певні переваги під час знімання ОЯПЦ: простоту управління, маневреність, надійність на режимах польоту навколо землі та місцевих предметів і споруд, можливості зависання в разі потреби. Перспективною авіаційною платформою для систем повітряного моніторингу ОЯПЦ є такий тип БПЛА, як мультикоптер [7]. Це універсальний, конструктивно надійний, компактний та економічний БПЛА (рис. 3) порівняно з БПЛА традиційної вертолітної схеми.

Мультикоптер є динамічно нестійким об'єктом управління, тому його обов'язково обладнують автоматичною системою пілотування [8], що суттєво підвищує ергономічність та надає змогу операторові зосередитися на виконанні завдань моніторингу.

Сучасні мультикоптери, що обладнуються безколекторними електродвигунами і літій-полімерними акумуляторами, забезпечують повітряне спостереження на відстанях від сотень метрів до кількох десятків кілометрів при швидкості польоту до 30–60 км/год протягом 10–30 хв за допомогою бортової аерознімальної апаратури масою від 0,3 до кількох кілограм, що здається цілком достатнім для повітряного моніторингу ОЯПЦ.



Рис. 4. Полікоптер НАУ ПК-08

Таблиця 1. Основні характеристики малогабаритних авіаційних інфрачервоних камер

Виробник	Камера	Тип приймача	Спектральний діапазон, мкм	Температурна точність, К	Кількість фотодетекторів	Розмір фото-детектора, мкм	Фокусна відстань, мм	Кутова розрізненість, мрад	Кут огляду, град.	Габарити, мм	Маса, кг
NEC	F30-IS 	Мікроболометр	8—13	2,0	160×120	34	10	3,07	28×21	Н/д*	0,3
Aero-Vironment	Mantis F 		8—14	1,0	320×240	25	7,5; 15; 35	3,33; 1,67; 0,71	56; 30; 13	Н/д*	0,32
FLIR	Tau 1 Core 		7,5—13,5	1,0	320×240	25	7,5; 9; 13; 19	3,33; 2,78; 1,92; 1,32	56; 48; 34; 24	30×31×36	0,1
FLIR	Tau 2/E 		7,5—13,5	0,5	640×480	17	7,5; 9; 13; 19; 25; 35; 50; 60; 100	2,27; 1,89; 1,31; 0,89; 0,68; 0,49; 0,34; 0,28; 0,17	72; 62; 45; 32; 25; 18; 12; 10; 6	45×45×30	0,32
FLIR	Quark 2 		7,5—13,5	0,5	640×480	17	6; 9; 13; 14; 17; 19; 35	2,83; 1,89; 1,31; 1,21; 1,0; 0,89; 0,49	84; 62; 45; 42; 35; 32; 18	82×82×42	0,28
Workswell	Thermal Vision 		Н/д	0,5	640×512	17	25; 35; 60; 100	0,68; 0,49; 0,28; 0,17	25; 18; 10; 6	79×46×48	0,18
ICI	Mirage 640P 	InSb	8—14	0,7	640×512	30	7; 13; 25; 50; 100	4,29; 2,31; 1,2; 0,6; 0,3	108; 73; 42; 22; 11	111×96×131	2,7
SPI	M1-D 	Мікроболометр	7—14	Н/д*	640×480	17	13; 19; 35	1,31; 0,89; 0,49	45; 32; 18	Ø114×152	0,9

Примітка. Нема даних.

Наразі аероспостережні мультикоптери активно розроблюються і в Україні, зокрема в Національному авіаційному університеті (НАУ) виготовляється ціла лінійка мультикоптерів різних класів (рис. 4) [9].

Сучасні інфрачервоні радіометри. Попередній аналіз температурних режимів ОЯПЦ свідчить, що в процесі їх повітряного моніторингу треба виявити температурні контрасти порядку 30—40 К та розрізнити абсолютні температурні відхилення ССВЯП не менш ніж у 10 К. Таким вимогам задовольняють сучасні тепловізійні камери початкового рівня з можливостями калібрування та дистанційного вимірювання температури об'єктів спостереження (інфрачервоні радіометри).

Багато компаній пропонують малогабаритні тепловізійні камери дальнього інфрачервоного діапазону з указаними можливостями. Деякі з цих камер спеціально призначені для встановлення на безпілотні носії, інші передбачають таку можливість [10]. Більшість наявних на ринку зразків авіаційних інфрачервоних радіометрів (табл. 1) побудовано на основі неохолоджуваних мікроболометричних матриць розміром не більше ніж 640×512 фотодетекторів 25- або 17-мікронного технологічного процесу, що суттєво обмежує просторові характеристики аерознімання (кутову розрізненість та кут огляду) порівняно з цифровими камерами видимого діапазону [11]. Вагові показники сучасних інфрачервоних радіометрів (маса не більша за 1 кг) допускають їх встановлення на легкі мультикоптерні платформи. В Україні також провадяться роботи зі створення малогабаритного супутникового мікроболометричного інфрачервоного спекторрадіометра [12], який легко адаптувати до застосування на авіаційному носії.

Параметри авіаційного інфрачервоного моніторингу контейнерів зберігання ВЯП. Можливість дистанційного визначення абсолютної температури T об'єктів інфрачервоного моніторингу базується на законі теплового випромінювання Планка [13]:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 L} + 1 \right)}, \quad (1)$$

де $c_1 = 1,19 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К — перша і друга радіаційні константи; λ — робоча довжина хвилі електромагнітного випромінювання; ε — спектральний коефіцієнт теплового випромінювання об'єкта; L — виміряна спектральна щільність енергетичної яскравості об'єкта спостереження.

Досить важливими є геометричні параметри аерознімання. Захоплення місцевості полем зору знімальної апаратури V та забезпечувана просторова розрізненість зображень d залежать від характеристик матричного фотоприймального пристрою, оптичної системи камери та висоти аерознімання H [14]:

$$V = n \cdot d = \frac{a n H}{f}, \quad (2)$$

де n — кількість елементів розрізнення в рядку зображення; a — розмір фотодетектора матричного фотоприймального пристрою; f — фокусна відстань оптичної системи.

Вибір фокусної відстані інфрачервоної камери та висоти аерознімання є компромісом між забезпеченням

потрібної детальності зображень та необхідністю огляду всього об'єкта [15]. Виходячи з (2),

$$\frac{B_0 f}{a n} \leq H \leq \frac{d_0 f}{a}, \quad (3)$$

де B_0 — поперечний розмір об'єкта спостереження; d_0 — детальність на місцевості, потрібна для впевненого розпізнавання елементів об'єкта на зображенні.

Геометричними характеристиками типового об'єкта (рис. 2) будуть величини B_0 та d_0 . При цьому $B_0 = 80$ м, а d_0 можна визначити за критерієм Джонсона [16] для імовірності 0,95 як

$$d = \frac{l_0}{12,8 \cdot 2}, \quad (4)$$

де $l_0 = 3,8$ м — розмір елемента об'єкта (контейнера).

У разі використання тепловізійної камери з параметрами $n = 640$, $a = 17$ мкм, $f = 35$ мм припустимий діапазон висот аерознімання становитиме $H = 257 \dots 306$ м, а якщо $f = 19$ мм, то $H = 139 \dots 166$ м, що є прийнятним для легкого мультикоптера.

Висновки

Застосування повітряного інфрачервоного моніторингу об'єктів ядерного паливного циклу є можливим і технічно реалізовним з невеликими витратами в рамках наявних авіаційних та тепловізійних технологій. Ідея такого типу моніторингу спрямована перш за все на попередження аварійних ситуацій, оскільки існуючі методи радіаційного моніторингу фіксують подію, що відбулася, і не здатні виявити передаварійний стан об'єкта. Впровадження повітряного інфрачервоного моніторингу надасть важливу додаткову інформацію про стан ОЯПЦ, засновану на принципово інших фізичних принципах її отримання, ніж в існуючих системах контролю. Важливою перевагою повітряного інфрачервоного моніторингу є висока оперативність (в масштабі часу, близькому до реального), площинність і просторова детальність, що суттєво скоротить витрати на створення й розгортання системи моніторингу. Зараз в Україні є всі умови для створення уніфікованої системи повітряного інфрачервоного моніторингу ОЯПЦ із застосуванням легких БПЛА мультикоптерної схеми. Впровадження такої системи значно поширить інформаційні можливості моніторингу цих важливих та небезпечних об'єктів і підвищить ядерну безпеку персоналу та населення, що проживає в околі сховищ та пунктів зберігання ядерних матеріалів і відходів.

Список використаної літератури

1. Красноруцкий В. С. Ядерный топливный цикл Украины / В. С. Красноруцкий // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. — № 5. — С. 66—69.
2. Шевцов А. И. Ядерно-топливный цикл Украины: быть или не быть? / А. Шевцов, Н. Земляной, А. Дорошкевич. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.db.niss.gov.ua/docs/energy/126.htm>
3. Дудар Т. В. Уранові руди як джерело потенційної небезпеки в разі несанкціонованого обігу радіоактивних матеріалів / Т. В. Дудар, М. А. Бугера, Г. В. Лисиченко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — № 4. — С. 51—54.

4. Аспекты создания системы мониторинга безопасности ЯТЦ / В. А. Блау, В. Г. Андронов, О. В. Калинин, С. Ф. Каримов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=98>

5. Барбашев С. В. Радиационный мониторинг в Украине: состояние, проблемы и пути их решения / С. В. Барбашев, В. И. Витко, Г. Д. Коваленко. — Одесса : Астропринт, 2011. — 80 с.

6. Устройство и описание СХОЯТ / Запорожская атомная электростанция (ЗАЭС). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.npp.zp.ua/Shoyat/Description>

7. Метод размещения сенсоров в зоне чрезвычайной ситуации на базе технологии составных динамических систем / А. И. Лысенко, Е. Н. Тачинина, А. В. Панченко, С. Э. Бурачинская, А. А. Олейник // Проблемы информатизации та управління. — 2014. — № 3(47). — С. 41—45.

8. Тытюк В. К. Управление движением мультикоптера по критерию эффективности преобразования ресурсов / В. К. Тытюк // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. — 2013. — Вип. 4(24). — С. 45—51.

9. Авионика беспилотных летательных аппаратов / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік, С. В. Павлова. — К. : Абрис-принт, 2012. — 464 с.

10. Bendig J. Introducing a low-cost mini-UAV for thermal- and multispectral-imaging / Bendig J., Bolten A., Bareth G. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2012. — Vol. XXXIX-B1. — P. 345—349.

11. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. — Львів : Львівська політехніка, 2013. — 316 с.

12. Лихолит Н. И. ИК-камера космического базирования с микроболومترической матрицей / Н. И. Лихолит, В. М. Тягур, Е. В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конференції "Авіа-2013". — К. : НАУ, 2013. — С. 61—63.

13. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. — М. : Сов. радио, 1978. — 400 с.

14. Дорожинський О. Л. Аналітична та цифрова фотограмметрія / О. Л. Дорожинський. — Львів : Львівська політехніка, 2002. — 164 с.

15. Станкевич С. А. Оптимізація параметрів видової аерознімальної апаратури за умовою максимуму середньої імовірності виявлення об'єктів на зображенні / С. А. Станкевич, С. В. Шкляр // Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. — 2005. — Вип. 8. — С. 133—136.

16. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. — М. : Мир, 1978. — 416 с.

References

1. Krasnorutskii, V. S. (2005), "Nuclear Fuel Cycle of Ukraine" [Yadernyi toplivnyi tsikl Ukrainy], Questions of Nuclear Science and Technology, 2005, No. 5, pp. 66—69. (Ukr)

2. Shevtsov, A. I., Zemlianoi, N., Doroshkevych, A. (2004), "Nuclear Fuel Cycle of Ukraine: to be or not to be" [Yaderno-toplivnyi tsikl Ukrainy: byt ili ne byt?], available at: <http://www.db.niss.gov.ua/docs/energy/126.htm>. (Rus)

3. Dudar, T. V., Bugera, M. A., Lysyuchenko, G. V. (2014), "Uranium Ores as a Source of Potential Risk Related to Illicit Trafficking of Radioactive Materials" [Uranovi rudy yak dzherelo potentsiinoi nebezpeky v razi nesanktsionovanoho obihu radioaktivnykh materialiv], 2014, No. 4, pp. 51—54. (Ukr)

4. Blau, V. A., Andronov, O. V., Kalinin, O. V., Karimov, S. F. (2005), "Some Aspects of the Monitoring Safety System Creation for the Nuclear Fuel Cycle" [Aspekty sozdaniia sistemy monitoringa bezopasnosti yaderno-toplivnogo tsikla], available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=98>

5. Barbashev, S. V., Vit'ko, V. I., Kovalenko, G. D. (2011), "Radiation Monitoring in Ukraine: State, Problems and Solution" [Radiatsionnyi monitoring v Ukraine: sostoianie, problemy i puti ikh resheniia], Odessa: Astroprint, 2011, 80 p. (Rus)

6. Arrangement and Description of the Dry Spent Fuel Storage Facility (Zaporizhzhya NPP) [Ustroistvo i opisaniie SKhOYaT / Zaporozhskaia atomnaia elektrostansiiia (ZAES)], available at: <http://www.npp.zp.ua/Shoyat/Description>

7. Lysenko, A. I., Tachinina, Ye. N., Panchenko, A. V., Burachinskaya, S. E., Oleinik, A. A. (2014), "Method of Sensor Location within the Emergency Zone on the basis of the Compound Dynamic Systems Technology [Metod razmeshcheniia sensorov v zone chrezvychnoi situatsii na baze tekhnologii sostavnykh dinamicheskikh system], Problems of Informatization and Management, No. 3(47), pp. 41—45. (Rus)

8. Tytiuk, V. K. (2013), "Multicopter Movement Handling According to Criteria of Resources Transformation Effectiveness" [Upravleniie dvizheniim multikoptera po kriteriiu effektivnosti preobrazovaniia resursov], Electromechanic and Energy Saving Systems, No. 4(24), pp. 45—51. (Rus)

9. Kharchenko, V. P., Chepizhenko, V. I., Tunik, A. A., Pavlova, S. V. (2012), "Avionics of Unmanned Aerial Vehicles" [Avionika bezpilotnykh litalnykh aparativ], Kyiv, Abris-print, 464 p. (Ukr)

10. Bendig J., Bolten A., Bareth G. (2012), "Introducing a Low-Cost Mini-UAV for Thermal- and Multispectral-Imaging", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B1, pp. 345—349.

11. Burshtynska, Kh. V., Stankevych, S. A. (2013), "Aerospace Surveying Systems" [Aerokosmichni znimalni systemy], Lviv, Lvivska politekhnika, 316 p. (Ukr)

12. Likholit, N. I., Tiagur, V. M., Kharitonenko, Ye. V. (2013), "Infrared Chamber of Space Stationing with Microbolometric Matrix" [IK-kamera kosmicheskogo bazirovaniia s mikrobolometricheskoi matritseii], Proceedings of XI International Scientific and Technical Conference "Avia-2013", Kyiv, NAU, pp. 61—63. (Rus)

13. Kriksunov, L. Z. (1978), "Reference Book on Fundamentals of Infrared Equipment" [Spravochnik po osnovam infrakrasnoi tekhniki], Moscow, Soviet Radio, 400 p. (Rus)

14. Dorozhinskii, O. L. (2002), "Analytical and Digital Photogrammetry" [Analitichna ta tsyfrova fotohrammetriia], Lviv, Lvivska politekhnika, 164 p. (Ukr)

15. Stankevich, S. A., Shklyar, S. V. (2005), "Optimization of Parameters of Satellite Aerial Surveying Equipment under condition of Maximum for Average Probability of Object Detection on the Image" [Optimizatsiia parametriv vydovoi aerezimialnoi aпаратури za umovoiu maksimumu serednioi imovirnosti vyvavlennia obiektiv na zobrazhenni], Collection of Research Papers of National Scientific and Research Institute of Aviation, Vol. 8, pp. 133—136. (Ukr)

16. Lloyd John (1978), Infrared Imaging Systems [Sistemi Teplovideniia], Moscow, Mir, 416 p. Translated from English. (Rus)

Отримано 13.07.2015.