

УДК 621.039.7

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2026.40.03>**Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М., Злобенко Б.П., Одукалець Л.А.**

Забулонов Ю.Л., доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0001-8239-8654, 1952zyl@gmail.com

Буртняк В.М., кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0003-1768-507X, burtn59@gmail.com

Злобенко Б.П., старший науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0001-9732-1924, borys.zl@gmail.com

Одукалець Л.А., науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID 0000-0003-2569-6406, laoduk@gmail.com

СИСТЕМА ПОШУКУ «ВТРАЧЕНИХ» ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БАЗІ БПЛА

У цій статті розглядається система на базі БПЛА, яка використовується для ефективного пошуку та локалізації джерел радіації, над якими був втрачений контроль. Розглянуто основні фактори, які впливають на точність аерогазаймки, а саме: фізичні параметри системи, техніку сканування місцевості та методологію обробки даних. Показано структуру системи, а також приведено її основні технічні параметри.

Методологія одержання даних, яка застосовується, спрямована на забезпечення повноти вимірювальної інформації, зниження невизначеностей, оптимізацію часу і ресурсів, підвищення точності під час проведення пошуку радіоактивних джерел.

Роль обробки даних полягає в тому, щоб виявити радіоактивні джерела, ідентифікувати та локалізувати їх, одержати оцінки концентрації радіоактивного забруднення на поверхні землі. Правильна інтерпретація даних вимірювання дає можливість відрізнити джерело від випадкових фонових коливань, прискорити локалізацію та знизити ризик помилок.

Особлива увага приділяється обробці даних, яка для бортової гамма-спектрометрії складається з процедур: калібрування, попередньої обробки (верифікація даних, спектральне згладжування, корекція «живого» часу вимірювання, корекція фону, виправлення спектрів, корекція висоти, відновлення даних до елементарних концентрацій, вирівнювання даних), картографування й оконтурювання зон радіоактивного забруднення, пошуку та ідентифікації радіоактивних джерел, їх географічної локалізації.

Запропоновані етапи попередньої обробки забезпечують: підвищення достовірності вимірів, зниження впливу сторонніх факторів, приведення даних до єдиного масштабу, вирівнювання спектрів, виділення піків для класифікації ізотопів, визначення активності, потужності дози, скорочення обсягу даних для подальшої обробки.

Для візуалізації радіаційного поля використовуються ГІС (QGIS, ArcGIS).

Для процесу локалізації джерела використовувалося перетворення Хафа, яке забезпечує визначення центрів кожного кругового розподілу радіоактивності.

Особлива увага приділяється практичним умовам використання гамма-спектрометрії на базі БПЛА для пошуку радіоактивних джерел. Для виявлення та локалізації джерела використовуються оригінальні алгоритми. Запропонована структура системи на базі БПЛА, алгоритми обробки даних дають змогу локалізувати джерела з радіоактивним випромінюванням у режимі квазіреального часу. Щоб перевірити обґрунтованість та продуктивність запропонованих стратегій, нами були проведені великі чисельні експерименти з різною кількістю джерел та їх розташуванням. Одержані результати показали, що запропонований підхід значно підвищує точність, швидкість та ефективність пошуку радіоактивних джерел, а також забезпечує можливість контролю, моніторингу й оперативного реагування на загрози ядерного тероризму або аварійні ситуації на об'єктах ЯПЦ.

Ключові слова: БПЛА, пошук джерела, локалізація джерела, радіаційний моніторинг, картування випромінювання.

Вступ. Пошук джерел гамма-випромінювання є одним із важливих завдань у рамках заходів радіо-екологічного моніторингу. Такі джерела можуть являти собою фрагменти зруйнованих конструкційних елементів ядерних реакторів, уламки виведених з орбіти штучних супутників Землі, обладнаних бортовими ядерними енергетичними установками,

джерела, які широко використовуються в медицині та різних галузях промисловості. Усі такі радіоактивні об'єкти можуть зумовити серйозну небезпеку життю і здоров'ю населення. Особливо слід зазначити, що в сучасних умовах є можливість навмисного застосування радіонуклідних джерел у терористичних цілях. Тому локалізація небезпечного об'єкта набуває безумовну значимість.

Під час пошуку радіоактивних джерел потрібно вирішувати декілька ключових завдань,



Це стаття відкритого доступу
за ліцензією CC BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

а саме: забезпечити надійне виявлення, ідентифікацію та локалізацію радіоактивного джерела. При цьому необхідне максимально достовірне визначення параметрів радіаційних джерел у мінімальні терміни, що дасть змогу своєчасно та цілеспрямовано привести в дію комплекс заходів щодо захисту населення від впливу іонізуючого випромінювання.

Для пошуку й локалізації джерел гамма-випромінювання необхідно мати сучасні системи, що легко транспортуються і які можна миттєво застосувати в місцях із повною відсутністю будь-якої інфраструктури. Технічні засоби на базі безпілотних повітряних систем (БПЛА) дають змогу істотно збільшити оперативність радіаційної розвідки. Серед переваг зазначених засобів – можливість обстеження територій із будь-яким ступенем радіоактивного забруднення, можливість розвідки місцевості, непрохідної для наземної техніки, а також значне скорочення витрат часу на збирання інформації.

Точність аерогамазйомки (AGRS – airborne gamma-gau spectrometry) залежить від безлічі факторів, включно з фізичними параметрами системи, технікою зйомки та обробкою даних. Швидкості підрахунку (імпульси за секунду – cps), які одержують із застосуванням AGRS, малі, і це призводить до великих похибок в оцінках радіоактивних джерел та встановленні їх місцезнаходження. Для типової AGRS (з висотою польоту 30–100 м та кроком зйомки 1 с похибка (стандартне відхилення) при визначенні активності джерела становить приблизно: 6,3 % для К; 12,3 % для еквівалентного урану (eU), 13,7 % для еквівалентного торію (eTh).

Найбільшим джерелом помилок у гамма-спектрометрії є статистичний шум, висота, геометрія польоту, атмосферні й фонові ефекти і недоліки під час обробки даних. Процедури обробки даних посилюють помилки при виявленні, ідентифікації та локалізації джерела. Тому для підвищення точності в разі пошуку втрачених радіоактивних джерел необхідно приділяти особливу увагу процедурі обробки аерогама-даних.

Технічні засоби. Роль технічних засобів під час пошуку джерел іонізуючого випромінювання є ключовою, оскільки вони забезпечують надійність, швидкість і точність виявлення. На цей час для вирішення завдань пошуку та виявлення джерел гамма-випромінювання використовують комплекси, що містять апаратуру повітряної радіаційної розвідки, яка монтується на базі БПЛА.

До складу такої системи включені апаратні засоби, що дають змогу проводити вимірювання дози й потужності радіаційного випромінювання

поверхні землі, яка обстежується, а саме спектрометр іонізуючого гамма випромінювання, мікропроцесорний контролер для проведення обчислень у реальному часі, додаткове обладнання для взаємодії з оператором і канали передачі даних.

Наша система використовує 3 датчики (спектрометри) на базі сцинтилятора $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ (25 x 35 мм) та фотодетектора Hamamatsu *SI4160-6050HS*, які записують 1024 безперервні канали даних в енергетичному діапазоні 0–3,0 MeV. АЦП з фіксованим часом перетворення 1 мкс. Вимірювання проводяться щонайменше один раз на секунду, і час реєстрації імпульсів автоматично фіксується та виводиться з потоком даних.

У системі також може бути присутнім додатковий кристал NaI (детектор, «спрямований вгору»), який має спрямовану чутливість і використовуватиметься для оцінки концентрації атмосферного фону.

Додаткове обладнання зазвичай включає GPS-навігацію, висотомір, барометр і термометр, які використовуються для корекції даних спектрометра. Гамма-промені з поверхні Землі ослабляються шаром повітря, на щільність якого, зі свого боку, впливає температура і тиск. GPS-навігація в реальному часі за допомогою модуля CUAV C-RTK2 HP забезпечує точність в межах 1 м. Датчик відстані на базі TF03-100 має точність приблизно 1 %. GPS навігаційна апаратура й висотомір фіксують миттєве положення та висоту БПЛА в кожну секунду. Температура й тиск також реєструються щосекунди. Передача даних між бортом та наземною станцією виконується модулями телеметрії на базі модемів RFD 900x

Структурну схему системи наведено на рис. 1.

Методологія одержання даних. Методологія одержання даних у разі пошуку радіоактивних джерел забезпечує: організацію вимірювань (впливає на повноту інформації, включає вибір маршрутів, точок та кроків вимірювань), зниження невизначеностей (контроль умов вимірювань, повторні виміри), оптимізацію часу і ресурсів, підвищення точності локалізації, створення бази для наступної обробки, безпеку персоналу (мінімум контакту з джерелом).

Повітряні аерогама-дослідження зазвичай проводяться на регулярній сітці вздовж паралельних ліній («галси»). Відстань між лініями польоту залежить від необхідної детальності зйомки. Для більшості обстежень, які використовуються для оперативного контролю радіаційної обстановки в разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного або терористичного характеру, відстань між лініями польоту зазвичай становить від 50 до 100 м.

Зйомки проводяться здебільшого на постійній висоті над землею від 10 до 30 м. Висота

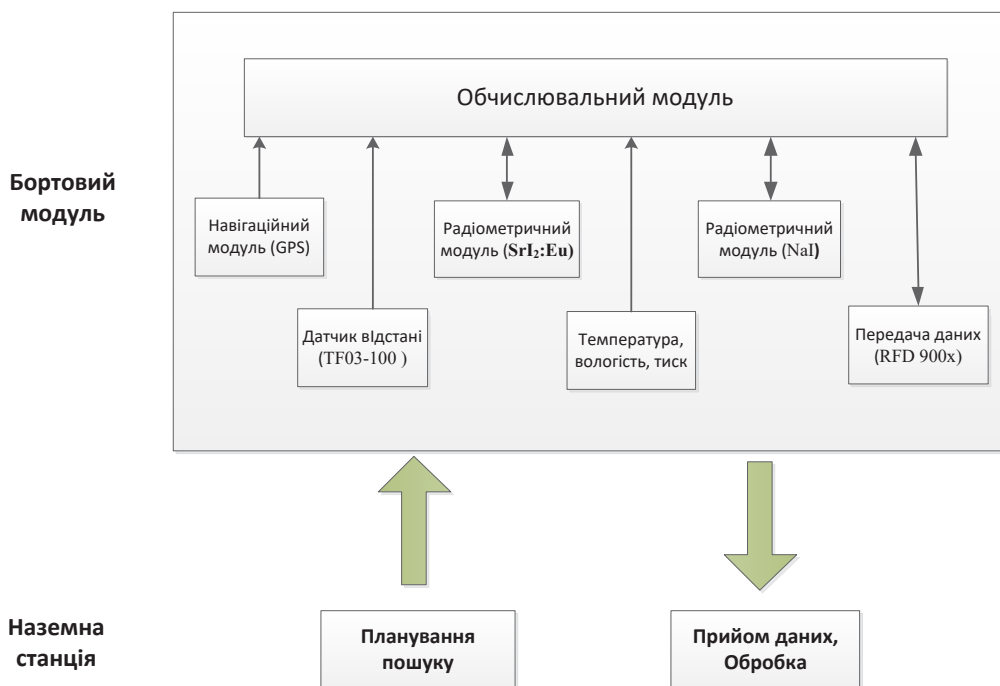


Рис. 1. Структурна схема системи

Fig. 1. System block diagram

БПЛА над землею та ступінь відхилення від цієї висоти залежать як від топографії, так і від майстерності пілота. Для додаткового набору ліній («зв'язкових ліній», або режиму «зшивання» галсів) часто застосовують прольоти перпендикулярно лініям польоту, відстань між якими приблизно в 5 разів перевищує інтервал галсів. Інтервал між галсами є компромісом між бажаною роздільною здатністю даних і вартістю зйомки. Висота польоту також пов'язана із цим інтервалом, але обмежена точністю вимірювань і міркуваннями безпеки. Оскільки поле зору детектора має діаметр приблизно вдвічі більший за висоту польоту, план польоту регулюється таким чином, щоб було невелике перекриття вимірювань. Швидкість БПЛА становить близько 1–5 м/с.

Очевидно, існує компроміс у зборі даних між одержаними під час вимірювання оцінками радіоактивного забруднення і самими польотами, а саме точність вимірювань, час вибірки, швидкість ЛА та просторова роздільна здатність задаються. Гамма-спектрометричні дані зазвичай отримують за інтервал вибірки, який дорівнює 1 с.

Дані аерогамма-спектрометрії радіаційного випромінювання можуть сильно спотворюватися на пересіченій місцевості через такі причини:

1. Сигнал випромінювання затухає приблизно з експоненціальною швидкістю зі збільшенням відстані до джерела, тим самим зменшуючи співвідношення даних сигнал / шум.

2. Швидкість згасання сигналу випромінювання з відстанню залежить від геометрії джерела – наприклад, сигнал від точкових джерел затухає швидше, ніж від джерел, у яких площа більша. Це впливає на точність корекції бортових даних по висоті.

3. Поле зору бортового спектрометра збільшується з висотою ЛА, таким чином, отримуємо зниження роздільної здатності для дискретних джерел.

4. У режимі «зшивання» галсів для спектрального вирівнювання висота лінії польоту відрізняється від висот галсів, що призводить до «вільного зшивання» поверхні польоту.

5. Геометрія джерела змінюється залежно від топографії поверхні та висоти БПЛА – наприклад, спостерігаємо підвищений сигнал у вузькій долині через внески схилів долини.

Перераховані проблеми можна пом'якшити завдяки таким прийомам:

1. Зйомка в «режимі зшивання», тобто відстеження радіоактивності на постійній висоті над місцевістю зі складною топографією.

2. Там, де долини мають круті схили, для зменшення кліренсу необхідно провести додаткові лінії паралельно долинам.

3. Збільшення об'єму кристала спектрометра, що істотно впливає на ефективність реєстрації, мінімально досліджувану активність, час вимірювання і точність результату (підвищується чутливість, знижується вимірювальний час, покращується співвідношення сигнал / шум).

4. Використання нових високоефективних алгоритмів обробки спектрометричних даних для виявлення, ідентифікації та локалізації радіоактивних джерел.

5. Застосування методів розв'язку оберненої задачі для мінімізації впливу топографії.

Обробка даних. Роль обробки даних полягає в тому, щоб виявити радіоактивні джерела, ідентифікувати та локалізувати їх, одержати оцінки концентрації радіоактивного забруднення на поверхні землі. Правильна інтерпретація даних вимірювання дає можливість відрізнити джерело від випадкових фонових коливань, прискорити локалізацію та знизити ризик помилок.

Обробка даних для бортової гамма-спектрометрії складається з таких процедур: калібрування (енергетичне, ефективності реєстрації), попередня обробка (верифікація даних, спектральне згладжування, корекція «живого» часу вимірювання, корекція фону, виправлення спектрів, корекція висоти, відновлення даних до елементарних концентрацій, вирівнювання даних), картографування й оконтурювання зон радіоактивного забруднення, пошук та ідентифікація радіоактивних джерел, їх географічна локалізація.

Калібрування. Калібрування за ефективністю реєстрації виконується для визначення коефіцієнта, який дорівнює відношенню суми зареєстрованих імпульсів у повному піку поглинання для відомого радіоактивного джерела до гамма-квантів, випущених цим джерелом. За результатами проведення калібрування за ефективністю одержують графік ефективності $\varepsilon(E)$ як функцію енергії від відстані до детектора. Для систем на базі БПЛА калібрування проводиться на спеціально підготовлених майданчиках з точно відомими концентраціями радіоактивних елементів. Тобто калібрувальні майданчики забезпечують точне визначення чутливості гамма-спектрометрів, сумісність результатів, зниження похибок через геометричні та статистичні фактори.

Енергетичне калібрування спектрометра – це процедура встановлення залежності між положенням піка (у каналах АЦП) та енергією випромінювання (кВ). З урахуванням нелінійності електроніки вона забезпечує: точне визначення співвідношення канал $\rightarrow$ енергія та правильну ідентифікацію ізотопів за енергією γ -ліній.

Для виконання процедури необхідно не менше ніж два джерела випромінювання, які мають чітко визначені позиції фотопіків. Вимірювання проводяться для «еталонних» джерел радіоактивного випромінювання, які мають чітко визначені енергетичні лінії. Час вимірювання становить принаймні 600 секунд, і визначають положення піків у

сумарному спектрі. Між положеннями фотопіків підбирається лінійна функція (число каналів x проти енергії E):

$$E = a \cdot x + b. \quad (1)$$

За потреби для компенсації нелінійності використовують квадратичні моделі.

Попередня обробка

Верифікація проводиться для контролю якості одержаних за результатами проведення вимірювань даних. Сюди належать такі процедури, як об'єднання даних із різних джерел, перевірка записаних даних (встановлення того, що зареєстровані значення є обґрунтованими), перевірка даних на відсутність помилкових значень (викиди артефактів). Деякі з вимірювальних параметрів слід відфільтровувати (наприклад, дані радарного висотоміра фільтрують, щоб згладити швидкі зміни, які виникають на пересіченій місцевості).

Спектральне згладжування застосовується для зменшення шуму в спектрі гамма-випромінювання, що дає змогу значно підвищити якість обробки даних. За результатами алгоритмічної обробки одержуємо реконструйовані спектри, які містять більшу частину вихідного сигналу й незначну частину шуму. Зараз для спектрального згладжування застосовуються метод NASVD (Noise Adjusted Singular Value Decomposition) [1] і метод MNF (максимальна частка шуму) [2]. Обидва методи використовують аналіз типу головних компонентів, виділяючи домінуючі спектральні форми (або «компоненти»), які присутні в необроблених спектрах. NASVD і MNF відрізняються способом нормалізування вхідних даних спектрів перед аналізом спектральних компонентів.

Інтервал часу τ , коли система зайнята обробкою попереднього імпульсу й нові події пропускаються, називається «мертвим часом», тобто детектор або може обробити новий сигнал, або робить це неправильно. Мертвий час знижує точність вимірів за високих cps , і значення його є критичним для отримання коректних результатів. Існують дві моделі корекції «мертвого часу»: час не продовжується (подія під час τ ігнорується) і час продовжується. Для моделі «непродовження» корекція виконується за формулою [3]:

$$v = \frac{v_{\text{obs}}}{1 - \tau \cdot v_{\text{obs}}}, \quad (2)$$

де v – скоригована cps (імпульсів/с); v_{obs} – спостережувана cps (імпульсів/с); τ – мертвий час.

Для моделі «продовження» корекція виконується за формулою:

$$v_{\text{obs}} = v \cdot e^{-v\tau}. \quad (3)$$

У цьому випадку система за високих активностей повністю втрачає здатність реєструвати імпульси.

Процедуру корекції фону можна розділити на дві: корекцію космічного фону та корекцію радонного фону. В першому випадку нормалізований спектр космічного фону віднімається з виміряного й відкоректованого на «живий» час спектра. Спектр космічного фону вимірюється над водою на кількох різних висотах (5, 15, 30 м) у зоні, де атмосферний радон мінімальний. Швидкість рахунку у вікні підрахунку космічного фону (космічному вікні) (3–6 MeV) лінійно пов'язана із срс кожного і-го енергетичного каналу. Тому лінійна регресія срс космічного вікна для будь-якого іншого конкретного каналу дає космічну чутливість (нахил лінії регресії) і фон БПЛА для цього каналу визначається таким чином:

$$v_i = a_i + n_{\text{cos}} \cdot b_i, \quad (4)$$

де v_i – швидкість рахунку космосу в і-му каналі; n_{cos} – швидкість підрахунку в космічному вікні; a_i – фон в і-му каналі; b_i – нормалізований фон в і-му каналі космічного вікна.

Для видалення фону атмосферного радону у світовій практиці використовують такі процедури: метод «спектрального співвідношення» [4], метод «повного спектра» [5] та метод детектора, який спрямований вгору. Перші два методи через значне забруднення поверхні землі ^{137}Cs в наших широтах не використовують. У методі детектора, що спрямований вгору, використовується додатковий кристал, який екранується від випромінювання знизу, щоб надати системі спрямовану чутливість і здатність розрізняти випромінювання атмосферного радону й наземні джерела радіації. Концентрація радону оцінюється за допомогою підсумовування спектрів за великі часові інтервали – зазвичай 200–600 с.

Для систем детектування з малим об'ємом детектора характерною є корекція спектрів для видалення розсіяних фотонів, які помилково попали в спектральні вікна з нижчою енергією. Цей процес відбувається, коли фотон передає лише частину своєї енергії сцинтилятору детектора. Наявність на місцевості, яка обстежується, високоенергетичних джерел може призвести до переоцінки інтенсивності випромінювачів із низькою енергією. Наприклад, гамма-промені торію з'являються як в урановому, так і в калієвому вікні, і гамма-промені серії урану з'являються в калієвому вікні.

Щоб врахувати цей факт, використовується процедура корекції спектрів, яка забезпечує коригування срс у вікнах, які досліджуються на гамма-промені, які не належать до конкретного

радіоелемента або серії розпадів. Наприклад, корекція для K, U та Th застосовується таким чином:

$$\begin{aligned} N_{th} &= \frac{n_{th} - z \cdot n_u}{1 - z \cdot \alpha}, \\ N_u &= \frac{n_u - \alpha \cdot n_{th}}{1 - z \cdot \alpha}, \\ N_k &= n_k - \beta \cdot N_{th} - \gamma \cdot N_u, \end{aligned} \quad (5)$$

де z, α, β, γ – коефіцієнти корекції: α – кількість нормалізованих відліків Th у вікні U для чистого джерела Th, β – кількість нормалізованих відліків Th у вікні K на для чистого джерела Th, γ – кількість нормалізованих відліків U у вікні K для чистого джерела U, а z – кількість нормалізованих відліків U у вікні Th для чистого джерела U.

Коефіцієнти корекції визначаються під час калібрування й дають можливість видалити вклад розсіяних фотонів у будь-якому енергетичному вікні, залишивши тільки справжню інтенсивність. Визначення таких коефіцієнтів може бути проблемою для системи детектування малого об'єму, оскільки обмежені об'єми детектора призводять до обмеженого енергетичного діапазону. Поширені природні радіонукліди (здебільшого ^{238}U / ^{235}U , ^{232}Th і ^{40}K) мають характерні спектральні вікна з енергією, що перевищує 1,3 MeV, що потребує для точного визначення коефіцієнтів корекції для детекторів малого об'єму в умовах аерогамазйомки великого часу вимірювань або дуже інтенсивних джерел. У разі аерозйомки до коефіцієнтів корекції повинна бути застосована поправка з урахуванням висоти зйомки [3]. Поправочні коефіцієнти наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти виправлення на висоті
Table 1. Altitude correction factors

Коефіцієнт	Збільшення на метр
α	0,00049
β	0,00065
γ	0,00069

Під час бортової зйомки висота детектора вздовж лінії польоту безперервно змінюється, тому виміряні дані повинні бути приведені до номінальної висоти вимірювання. Швидкість підрахунку залежно від висоти зйомки для діапазону висот (5–100 м) змінюється приблизно за експоненціальним законом. Оцінка срс для нескінченних джерел і помірної топографії за заданої оглядової висоти дорівнює:

$$n = n_0 e^{-\mu(H-h)}, \quad (6)$$

де μ – коефіцієнт ослаблення (на метр); n_0 – швидкість рахунку на висоті h , яку одержуємо під час

зйомки; n – виправлена швидкість підрахунку для номінального кліренсу місцевості H .

У гірських районах можуть знадобитися точніші алгоритми.

Оскільки швидкість підрахунку в повітрі залежить від щільності повітря між детектором і землею, вона також залежить від температури повітря та тиску. Спостерігаються значні зміни тиску з барометричною висотою, і ці зміни мають великий вплив на cps у повітрі. Корекція на коливання температури також є важливою частиною процедур обробки, оскільки річні коливання температури можуть значно змінити cps у повітрі над тим самим джерелом наземного випромінювання.

Ефективна висота (h_{pr}) за стандартних температури (273,15 °K) і тиску (101,325 кПа) становить [3]:

$$h_{pr} = \frac{273.15 * P * h_s}{101.325 * (T + 273.15)}, \quad (7)$$

h_s – виміряна висота (метри); h_{pr} – еквівалентна висота (метри); T – температура повітря (°C); P – барометричний тиск (кПа).

Дані температури, тиску та датчика відстані фільтрують перед застосуванням. Коефіцієнти ослаблення висоти розраховуються на основі даних, отриманих під час калібрування. Приклад зміни коефіцієнту затухання наведено на рис. 2.

Виміряні cps залежать не тільки від наземних концентрацій радіоактивних джерел, але й від висоти польоту. Проте отримані дані вимірювання повинні бути незалежними від приладів та параметрів вимірювання. Таким чином, швидкість підрахунку повинна бути перетворена в базову концентрацію радіоактивних джерел. Найпростіший

спосіб досягти цього – розділити кожну скориговану у вікні cps на коефіцієнт «чутливості». Коефіцієнти для кожного вікна оцінюються на основі даних, отриманих під час польотів у режимі калібрування. Коефіцієнти оцінюються шляхом ділення середнього фону, знятої та скоригованої cps у вікні на номінальній висоті вимірювання на відповідну середню концентрацію, виміряну на землі під час калібрування, тобто:

$$S = N/C, \quad (8)$$

де N – середня швидкість підрахунку з корекцією фону та приведена до номінальної висоти вимірювання (c/s); C – середня концентрація, виміряна на землі; S – коефіцієнт чутливості.

Концентрації радіоактивних джерел у процесі калібрування вимірюються за допомогою добре відкаліброваного портативного спектрометра одночасно з отриманням даних із повітря. Це дає можливість оцінити вихід випромінювання від землі з урахуванням факторів, які заважають: вологість ґрунту й інші фактори навколишнього середовища.

Ця процедура не враховує проникаючої природи гамма-випромінювання, тому забезпечує лише приблизні оцінки справжніх концентрацій. Наприклад, у разі бортового вимірювання точкового джерела отримуємо широку аномалію, яка поширюється на декілька точок вимірювання. Кращі оцінки справжніх наземних концентрацій джерела отримують шляхом деконволюції функції відгуку джерело / детектор на cps різних елементів [6].

Оцінку потужності поглиненої повітрям дози (у nGx^{-1} , тобто наногреях на годину) на рівні землі

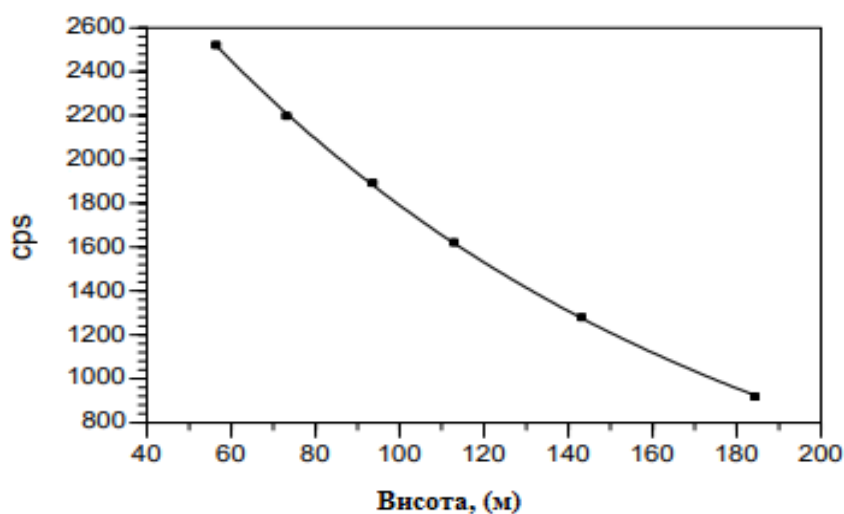


Рис. 2. Графік залежності затухання cps усього спектра від висоти

Fig. 2. Graph of cps attenuation of the entire spectrum versus altitude

від природних джерел випромінювання можна отримати із загальної швидкості рахунку, використовуючи вираз:

$$D = N/K, \quad (9)$$

де D – потужність поглиненої повітрям дози; K – коефіцієнт перетворення (визначається експериментально під час калібрування); N – скоригована загальна срс.

Під час виконання аерозйомки можуть виникати систематичні спотворення даних через різні фактори: зміна висоти польоту, коливання чутливості детектора, зміни випромінювання фону та джерела, ефекти впливу вологості ґрунту. Тому для корекції даних використовуються перехресні зв'язки. Пересічні лінії проводять перпендикулярно лініям польоту з інтервалами, ширина яких приблизно в 5 разів перевищує інтервал між галсами. Пересічні лінії дають можливість порівняти виміри для тієї самої точки з різних напрямків. Такі лінії дають змогу: виявити розходження між зйомками вздовж основних галсів; виконати коригування даних, забезпечуючи гладкість переходів між зонами; виявляти й усувати аномалії через тимчасові зміни (наприклад, зміни в атмосфері, радонові сплески); перевірити геолакаційні та геометричні помилки (включно з уточненням grps-координат, часом реєстрації та параметрами польоту).

Картографування й оконтурювання зон радіоактивного забруднення

Під час сканування місцевості інтенсивність срс може змінюватися поступово або різко залежно від розташування джерела. Регіон може мати високі значення інтенсивності через вплив

кількох джерел або розташованих поблизу потужних джерел, тому виявити окремі джерела через невідому інформацію про дифузії кожного джерела є складною задачею. Щоб передбачити можливе розташування джерел, намагаємося показати кумулятивний радіаційний ефект, відображаючи розподіл радіоактивної інтенсивності на географічній карті.

Оконтурювання – ключовий етап у візуалізації та аналізі даних про радіоактивне забруднення. Він перетворює точкові виміри на зрозумілі карти зон ризику знаходження радіаційного джерела, що є важливим для екстрених реагувань, екологічних оцінок, планування та документування аварійних та поставарійних ситуацій. На основі контурів визначають територіальні зони: від евакуаційних (зона відчуження) до зон контролю або з тимчасовою нормою проживання. Це було актуально, наприклад, після Чорнобиля.

Нині побудову картосхем радіаційного забруднення досліджуваних територій на основі точкових вимірювань здійснюють геоінформаційними програмами, які за допомогою математичних методів інтерполяції допомагають одержати необхідний результат. Геоінформаційні програмні продукти пропонують кілька варіантів інтерполяції, найпоширенішими з яких є [7]: IDW (inverse distance weighted), kriging, spline, spline with barriers, trend surface analysis тощо (рис. 3).

У наших дослідженнях було використано метод **Natural neighbor**. Цей метод інтерполяції використовується для відновлення значень у довільних точках за даними, заданими у вигляді розрізненого набору точок. Natural Neighbor більш адаптивний до геометрії точок, не дає різких границь, не вимагає глобальної апроксимації і

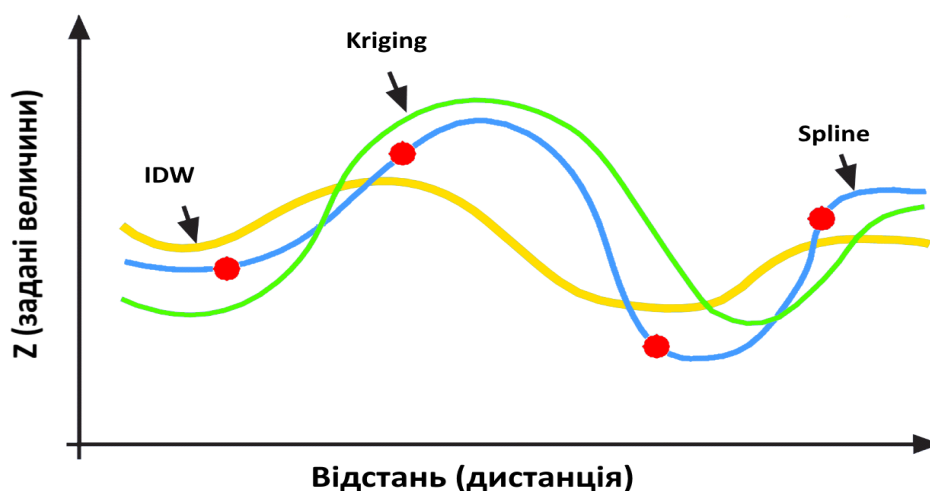


Рис. 3. Відхилення значення пікселя отриманого зображення від значення заданої точки із застосуванням різних методів інтерполяції
Fig. 3. Deviation of the pixel value of the obtained image from the value of a given point when using different interpolation methods

враховує тільки локальних сусідів, добре працює для розріджених даних і нерівномірної сітки.

Пошук та ідентифікація радіоактивних джерел

Для виявлення радіоактивних джерел використовують різні методи. Більшість з них – порогові, у яких ключовим моментом для виявлення джерела є заздалегідь виміряний фон (коли точно відомо, що джерело контролю відсутнє в полі зору детектора). Для ухвалення рішення про наявність чи відсутність джерела результат вимірювань порівнюється із фоном.

Дослідження показують, що рівень фону, що вимірюється з інтервалами усереднення за 100–300 с або більше, може змінюватися за 20–30 хв зі швидкістю 10-СКВ, а за 2–3 години (за час проведення пошуку) мінятися за абсолютною величиною на 50 %. Адаптацію до флуктуацій середнього рівня фону в задачах пошуку радіоактивних джерел вирішити непросто. Абсолютно неприйнятний такий, наприклад, прийом, як вихід із зони пошуку кожні 15–20 хвилин для уточнення рівня фону. Частіше вдаються до єдиного можливого в зазначених ситуаціях способу завищення (загрублення) порогів виявлення.

Більшість штучних радіоактивних джерел випромінюють порівняно з природними радіоактивними джерелами більше низько енергетичних гамма-променів. Таким чином, величина співвідношення c_{ps} для вікон низької (Н) та високої (В) енергії спектра свідчить про наявність техногенних (Т) нуклідів. Енергія 1400 кеВ часто використовується як номінальний верхній поріг випромінювання штучних радіоактивних джерел. Техногенний компонент можна розрахувати за допомогою виразу:

$$T = H - AV, \quad (10)$$

де A – співвідношення швидкостей рахунку в області низької та високої енергії для природного випромінювання ($A = H_{\text{ф}}/V_{\text{ф}}$).

Відомий також спосіб пошуку та виявлення, головною відмінною рисою якого є те, що перед початком процедури пошуку та виявлення не потрібно вимірювати фон [8]. Цей спосіб має ряд істотних переваг, а саме:

- відпадає необхідність попереднього вимірювання фону перед початком процедури пошуку, тим самим скорочується загальний час пошуку;
- забезпечується можливість проведення пошуку джерел в умовах нестаціонарного фону.

У наших дослідженнях для виявлення радіоактивного джерела було використано інформаційний метод [9], суть якого полягає в тому, що для порівняння спектрів застосовується інформаційний підхід, згідно з яким за відомими виразами

К. Шеннона [10] обчислюємо значення критерію порівняння:

$$A = 1 - \frac{H}{H_0};$$

$$H = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot \log P_i) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{N_0} \cdot \log \frac{N_i}{N_0} \right);$$

$$H_0 = \log n; \quad (11)$$

де, H_0 – максимальна і H – поточна ентропія масивів даних; P_i – імовірність прийняття системою вимірювання i -го стану; n – число класів гістограми спектра; N_i – число попадання зареєстрованих імпульсів радіоактивного випромінювання в цей клас; N_0 – число спостережень; $0 \leq A \leq 1$.

Для порівняння гістограм енергетичну шкалу спектрометра розбиваємо на M інтервальних груп. Площа кожного стовпчика гістограми матиме розмірність імовірності попадання результатів вимірювання в цей інтервал M_j , а сумарна площа під всією гістограмою дорівнює одиниці.

На основі аналізу даних, які одержані в процесі проведених експериментів, можна дійти висновку, що зміщення модальних інтервалів, зміна їх амплітуди та збільшення розмаху є ознакою внесення джерела радіоактивного випромінювання в поле зору детектора, а час, протягом якого спостерігається збільшення середнього значення A_j , може бути показником тривалості перебування джерела в полі зору детектора.

Слід зазначити, що зміщення модального інтервалу гістограми розподілу енергій зареєстрованих імпульсів є не середньостатистичним, а індивідуальним показником активності радіоактивного джерела.

Багатоканальні спектрометри можна використовувати для ідентифікації та розрізнення різних штучних ізотопів. Більш складним способом для розділення радіоактивних компонентів є спектральна деконволюція [11]. Цей метод є складним і вимагає знання спектральних форм кожного з джерел, що вносять свій вклад.

Географічна локалізація

Для процесу локалізації джерела використовуватимемо перетворення Хафа (НТ) – це алгоритм, що дає змогу знаходити кола на зображенні, навіть якщо вони частково приховані або зашумлені [12]. Підхід НТ достатньо точний, якщо ми маємо справу з кластеризованими джерелами, тобто коли джерела зосереджені в окремих зонах (класах). Він може локалізувати положення джерела, досліджуючи тільки контурну лінію області, у якій зосереджене радіоактивне джерело.

Щоб реалізувати НТ для локалізації джерел, необхідно лінії маршрутів БПЛА з виміряними c_{ps} перетворити на матрицю бінарного

зображення. Потім для зменшення обчислювального навантаження вихідну роздільну здатність бінарного зображення понижують. За допомогою фільтра Кенні виділяємо контури на зображенні. Фільтр Кенні шукає області зображення, де різко змінюється яскравість (градієнт), і виділяє їх як межі, при цьому мінімізуючи помилкові спрацювання та розриви.

Для вибору кругів Хафа необхідно визначити максимальну та мінімальну довжину радіуса. Після цього процес перетворення визначає центр кожного кругового розподілу.

Процес визначення кругів Хафа чутливий до параметра радіуса. Без хорошого параметра радіуса НТ не можна точно оцінити положення джерел. НТ не вимагає інформації про розміщення області інтересів. Псевдокод для алгоритму локалізації радіоактивних джерел такий:

Крок 1. Одержати галси з даними вимірювань.

Крок 2. Побудувати двомірну матрицю активностей.

Крок 3. Конвертувати матрицю активностей в бінарне зображення Image.

Крок 4. Якщо потрібно, понизити роздільну здатність Image.

Крок 5. Виконати фільтр Кенні.

Крок 6. Задати minRadius і maxRadius.

Крок 7. Виконати перетворення Хафа, отримати center.

Крок 8. Конвертувати center в географічні координати.

Оскільки НТ дає можливість отримувати оптимальні результати для кластеризованих джерел, то його легко адаптувати для набору ізольованих джерел. НТ може радикально скоротити витрати на розвідку.

Висновки. Гамма-спектрометрія на основі системи БПЛА є найбільш економічно ефективною для моніторингу та пошуку джерел радіоактивного випромінювання. Дослідження за допомогою БПЛА можуть розпочатися з моменту, коли з'являються перші ознаки перевищення природного радіаційного фону або є оперативна інформація про можливу загрозу. Запропонована структура технічних засобів для пошуку джерел радіації дає змогу швидко виявляти джерело, визначати його характеристики та розташування, при цьому мінімізуючи ризик для людини.

Польоти можуть бути автоматизовані, маршрути польотів та їх параметри можна використовувати для виявлення змін радіоактивного поля поверхні, яка обстежується.

Для дослідження великої території за допомогою БПЛА ми пропонуємо прийняти стратегію топографічного картування радіоактивного

випромінювання з визначенням контурів на зображенні з активністю, яка різко змінюється.

Для топографічного радіаційного картування необхідні три ключові блоки: вимірювальне обладнання, методологія одержання даних та методика й алгоритми обробки даних, де особлива роль відводиться попередній обробці.

Попередня обробка забезпечує: підвищення достовірності вимірів (фільтрацію шумів, усунення випадкових викидів); зниження впливу сторонніх факторів (корекція фону, компенсація мертвого часу детектора, температурна стабілізація чутливості); приведення даних до єдиного масштабу (енергетичне калібрування спектрів, калібрування за ефективністю, нормалізація за часом та обсягом вимірювань, прив'язка до часу та координат); підготовка до автоматичного розпізнавання (вирівнювання спектрів, виділення піків для класифікації ізотопів, визначення активності, потужності дози); скорочення обсягу даних для подальшої обробки (видалення зайвих каналів, усереднення значень).

Для візуалізації радіаційного поля використовуються ГІС (QGIS, ArcGIS).

Для процесу локалізації джерела використовувалося перетворення Хафа, яке забезпечує визначення центрів кожного кругового розподілу радіоактивності. Запропонована стратегія локалізації джерел радіації демонструє свою ефективність, оптимізуючи компроміс між вартістю розвідки та точністю локалізації джерела.

Хоча джерела радіації можуть бути довільно розташовані в невідомому полі радіації, запропонована стратегія пошуку й алгоритми обробки вимірювальної інформації не лише прискорюють час виконання місії, а й забезпечують точну оцінку їх розташування.

Показано, що можна швидко локалізувати джерело радіоактивності за допомогою одного БПЛА.

Література

1. Zhang S., Wang Y., Wang R. A method for determining the effective order of NASVD denoising for the airborne gamma-ray spectrometry data. *Nuclear Engineering and Technology*. 2025. Vol. 57.
2. Green A., Berman M., Switzer P. Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1988.
3. Airborne gamma ray spectrometer surveying. Vienna : International Atomic Energy Agency, 1991. ISBN 92-0-125291-9. – ISSN 0074-1914.
4. Xia J., Song B., Gu Y. Application of advanced spectral-ratio radon background correction in the UAV-borne gamma-ray spectrometry. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Vol. 55.
5. Minty B.R.S. Multichannel models for the estimation of radon background in airborne gamma-ray spectrometry. *Geophysics*. 1998. Vol. 63.
6. Chaudhuri S. et al. Blind Image Deconvolution: Methods and Convergence. – Cham : Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10485-0.

7. ECRI-CIS : вебсайт. ECRI-CIS Official Website
8. Methods to identify and locate spent radiation sources. Vienna : International Atomic Energy Agency, 1995. ISSN 1011-4289.
9. Буртняк В. М., Забулонов Ю. Л., Золкін І. О., Дивизинюк М. М., Гончаренко Ю. Ю. Виявлення нестаціонарних джерел радіоактивного випромінювання шляхом застосування інформаційного методу. *Сучасний захист інформації*. 2011. № 2. С. 100–106. http://nbuv.gov.ua/UJRN/szi_2011_2_15.
10. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 1948. Vol. 27. P. 379–423.
11. Alessio S.M. Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists. Springer, 2016. 200 p. ISBN 978-3-319-25468-5.
12. Ballard D.H. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes. *Pattern Recognition*. 1981. Vol. 13, No. 2. P. 111–122.

References

1. Zhang, S., Wang, Y. and Wang, R. (2025). A method for determining the effective order of NASVD denoising for the airborne gamma-ray spectrometry data. *Nuclear Engineering and Technology*, 57.
2. Green, A., Berman, M. and Switzer, P. (1988). Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

3. International Atomic Energy Agency (1991), *Airborne gamma ray spectrometer surveying*, IAEA, Vienna, ISBN 92-0-125291-9, ISSN 0074-1914.
4. Xia, J., Song, B. and Gu, Y. (2023). Application of advanced spectral-ratio radon background correction in the UAV-borne gamma-ray spectrometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 55.
5. Minty, B.R.S. (1998). Multichannel models for the estimation of radon background in airborne gamma-ray spectrometry. *Geophysics*, 63.
6. Chaudhuri, S. et al. (2014). Blind Image Deconvolution: Methods and Convergence. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-10485-0.
7. ECRI-CIS. Internet resource. ECRI-CIS Official Website.
8. International Atomic Energy Agency (1995), *Methods to identify and locate spent radiation sources*, IAEA, Vienna, ISSN 1011-4289.
9. Burtnyak, V.M., Kabulonov, Yu.L., Zolkin, I.O., Dyvyzyniuk, M.M. and Honcharenko, Yu.Yu. (2011). Vyiavlennia nestatsionarnykh dzherel radioaktyvnoho vyprominiuvannia shliakhom zastosuвання informatsiinoho metodu. Suchasnyi zakhyt informatsii, 2, 100–106. http://nbuv.gov.ua/UJRN/szi_2011_2_15.
10. Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
11. Alessio, S.M. (2016). Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists. Springer. ISBN 978-3-319-25468-5.
12. Ballard, D.H. (1981). Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes. *Pattern Recognition*, 13(2), 111–122.

UAV-BASED SEARCH SYSTEM FOR "ORPHAN" SOURCES OF IONIZING RADIATION

Zabulonov Yu.L., Burtnyak V.M., Zlobenko B.P., Odukalets L.A.

Zabulonov Yu.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID 0000-0001-8239-8654, 1952zyl@gmail.com

Burtnyak V.M., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID 0000-0003-1768-507X, burtn59@gmail.com

Zlobenko B.P., Senior Researcher, State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID 0000-0001-9732-1924, borys.zl@gmail.com

Odukalets L.A., Research Fellow, State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID 0000-0003-2569-6406, laoduk@gmail.com

This article discusses a UAV-based system used for effective search and localization of radiation sources over which control has been lost. The main factors affecting the accuracy of aerial gamma-ray imaging are considered, namely: physical parameters of the system, terrain scanning technique and data processing methodology. The system structure is shown and its main technical parameters are given.

The data acquisition methodology used is aimed at ensuring the completeness of measurement information, reducing uncertainties, optimizing time and resources, and increasing accuracy when searching for radioactive sources.

The role of data processing is to detect radioactive sources, identify and localize them, and obtain estimates of the concentration of radioactive contamination on the earth's surface. Correct interpretation of measurement data allows you to distinguish the source from random background fluctuations, speed up localization, and reduce the risk of errors.

Particular attention is paid to data processing, which for onboard gamma spectrometry consists of the following procedures: calibration, pre-processing (data verification, spectral smoothing, correction of "live" measurement time, background correction, spectral correction, height correction, data restoration to elemental concentrations, data alignment), mapping and contouring of radioactive contamination zones, search and identification of radioactive sources, their geographical localization.

The proposed stages of pre-processing provide: increasing the reliability of measurements, reducing the influence of extraneous factors, bringing data to a single scale, spectral alignment, highlighting peaks for isotope classification, determining activity, dose rate, reducing the volume of data for further processing.

GIS (QGIS, ArcGIS) are used to visualize the radiation field.

The Hough transform was used for the source localization process, which provides determination of the centers of each circular distribution of radioactivity.

Special attention is paid to the practical conditions of using gamma spectrometry based on UAVs to search for radioactive sources. Original algorithms are used to detect and localize the source. The proposed structure of the UAV-based system, data processing algorithms allow to localize sources with radioactive radiation in quasi-real time. To verify the validity and performance of the proposed strategies, we conducted large-scale numerical experiments with different numbers of sources and their locations. The results obtained showed that the proposed approach significantly increases the accuracy, speed and efficiency of searching for radioactive sources, and also provides the ability to control, monitor and respond promptly to threats of nuclear terrorism or emergencies at nuclear power plants.

Key words: UAV, source search, source localization, radiation monitoring, radiation mapping.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026