

УДК 621.039.7

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2025.39.07>**Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М., Архіпенко О.М., Злобенко Б.П.,  
Носенко Т.І., 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

**Архіпенко О.М.**, науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», ORCID: 0000-0003-0955-3704, scerarcis@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

**Носенко Т.І.**, кандидат технічних наук, доцент, кафедри комп'ютерних наук, Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, ORCID: 0000-0002-7597-9861, t.nosenko@kubg.edu.ua

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

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ: ВІД ПЕРЕТВОРЕННЯ ХАФА ДО СУБПКСЕЛЬНОГО УТОЧНЕННЯ

У роботі розглядається актуальна проблема оперативного пошуку та локалізації втрачених джерел іонізуючого випромінювання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Традиційні методи радіаційної розвідки стикаються з викликами обробки розріджених просторових даних та високого рівня стохастичного шуму, характерного для бортових детекторів. Метою роботи є розроблення стійкого (робастного) алгоритмічного забезпечення для автоматизованої реконструкції радіаційних полів та високоточної ідентифікації аномалій.

Запропоновано гібридний підхід, що адаптує методи комп'ютерного зору для задач радіоекологічного моніторингу. Методологія обробки даних включає: просторову інтерполяцію методом природних сусідів для відновлення безперервної топології поля; адаптивну фільтрацію Гаусса для мінімізації пуассонівського шуму; виділення градієнтних контурів за допомогою детектора Саппу. Ключовим етапом є застосування перетворення Хафа для детекції центрів радіаційних аномалій, параметри яких додатково уточнюються алгебраїчним методом Таубіна для досягнення субпіксельної точності.

Валідацію запропонованого підходу проведено шляхом чисельного моделювання з імітацією реальних умов польоту та статистичних характеристик розпаду. Результати експериментів продемонстрували високу точність алгоритму: середньоквадратична похибка локалізації (RMSE) становила 0.99 м. Ефективність методики також підтверджено на натурних даних, отриманих під час моніторингу ділянки «Піщане плато» у Чорнобильській зоні відчуження. Доведено, що розроблений підхід дає змогу локалізувати джерела в режимі квазіреального часу, що робить його ефективним інструментом для систем реагування на радіаційні загрози.

**Ключові слова:** БПЛА, радіаційний моніторинг, перетворення Хафа, метод Таубіна, локалізація джерел, обробка розріджених даних, комп'ютерний зір.

**Вступ.** В умовах сучасних викликів ядерної безпеки критичного значення набуває проблема виявлення та локалізації так званих «сирітських джерел» – радіоактивних матеріалів, що опинилися поза державним регулюванням унаслідок втрати, крадіжки або техногенних аварій. На відміну від масштабних радіаційних інцидентів із чітко окресленим епіцентром локальні радіаційні аномалії, спричинені точковими джерелами високої активності, становлять асиметричну загрозу для населення та екології. Оперативне вилучення таких об'єктів вимагає мінімізації часу пошуку за забезпечення безпеки персоналу.

Традиційні методи наземної розвідки, попри їхню точність, є часозатратними та пов'язані з

ризиком опромінення операторів. Пілотована аеро-гамма-зйомка (AGRS), своєю чергою, обмежена висотою польоту, що знижує чутливість до точкових джерел малої потужності. У цьому контексті перспективною альтернативою стають мобільні системи на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони забезпечують можливість низьковисотного моніторингу в зонах зі зруйнованою інфраструктурою та високим рівнем небезпеки.

Однак упровадження БПЛА породжує нову науково-технічну проблему обробки даних. Обмежена вантажопідйомність дронів змушує використовувати компактні детектори з меншою ефективністю реєстрації, що в умовах швидкого переміщення носія призводить до значного

впливу стохастичного шуму. Ба більше, дискретний характер траєкторії польоту формує масиви просторово-розріджених даних, для яких стандартні методи інтерполяції часто генерують хибні артефакти або згладжують реальні піки. Отже, виникає об'єктивна необхідність у розробленні робастних алгоритмів реконструкції радіаційних полів, здатних вирішувати обернену задачу локалізації джерела в умовах невизначеності та шуму.

Огляд літератури. Сучасні дослідження у сфері радіаційного контролю демонструють зміну парадигми – від використання стаціонарних постів до мобільних роботизованих платформ та від простих методів інтерполяції до гібридних алгоритмів на основі машинного та комп'ютерного навчання.

#### **Геостатистичні основи та обмеження традиційних методів**

Традиційно моделювання радіаційних полів спирається на геостатистичні підходи. Фундаментальні роботи (Chilès & Delfiner, 2012) та дослідження (G. Dubois, 2008) заклали основу використання крігінгу для картування невизначеності. Для підвищення достовірності карт (Хомутінін, Левчук, Процак, & Кашпаров, 2020; Опанасюк & Мокін, 2025) пропонують урахувувати логнормальний розподіл забруднення та використовувати спеціалізовані бібліотеки, такі як SciKit-GStat. Однак Триснюк та Нагорний (2024) зауважують, що точність інтерполяції критично залежить від щільності вимірів, якої важко досягти в аварійних умовах. Для компенсації нестачі даних автори пропонують інтегрувати апріорну інформацію про джерело в процесі обробки.

**БПЛА як платформа для радіаційної розвідки** Безпілотні комплекси стають стандартом для роботи в зонах ризику. Chen et al. (2020) на прикладі системи ARDUO довели, що низьковисотний політ дає змогу виявляти локальні «гарячі точки», які осереднюються та зникають під час пілотованої аеророзвідки. Martin et al. (2016) розширили цей підхід, запропонувавши 3D- картування для аналізу міграції радіонуклідів у складних ландшафтах. Водночас Носенко та Машкіна (2025) вказують на необхідність спеціалізованих архітектур для обробки «шумних» даних із БПЛА, пропонуючи тривірневу модель моніторингу. Trusnyuk et al. (2023) запропонували методику й алгоритм обробки інформації про радіоактивне забруднення місцевості під час виявлення радіаційної обстановки з урахуванням апріорної інформації про джерела радіоактивного забруднення місцевості, яка дає змогу підвищити достовірність і оперативність виявлення фактичного радіоактивного забруднення місцевості.

Rorov, et al. (2023) описали переваги та недоліки БПЛА серед інших мобільних платформ, а також проблеми, що виникають у місіях та сценаріях радіоактивного середовища.

#### **Новітні обчислювальні методи: від FPGA до Neural Networks**

Для боротьби зі стохастичним шумом детекторів дедалі частіше застосовуються передові обчислювальні методи. Xu et al. (2026) розробили апаратний метод шумозаглушення на базі FPGA, який працює у реальному часі та перевершує класичні фільтри. Lin et al. (2024) розглядають застосування глибоких нейронних мереж для покращення якості радіаційних зображень. Також перспективним є підхід Kasperek & Podpora (2024), які оптимізують геопросторові дані для алгоритмів комп'ютерного зору, видаляючи нерелевантні області. Особливу увагу привертають імовірнісні методи, такі як регресія гаусівських процесів, які успішно адаптували для радіаційного картування (West et al., 2021), а також методи взаємної локалізації дронів у рої.

#### **Алгоритмічний базис дослідження**

Для вирішення задачі локалізації джерел на розріджених даних у даній роботі адаптовано класичні алгоритми комп'ютерного зору та обчислювальної геометрії. Зокрема, використовується детектор країв Canny для виділення границь аномалій та перетворення Хафа для визначення їхніх центрів. Для інтерполяції розріджених треків БПЛА вибрано метод природних сусідів, який забезпечує коректну топологію поверхні, а для субпіксельного уточнення координат застосовано алгебраїчний метод Таубіна.

**Метою роботи** є розв'язання оберненої задачі локалізації точкових джерел іонізуючого випромінювання за даними мобільного моніторингу в умовах стохастичної невизначеності шляхом розробки робастного гібридного алгоритму, що забезпечує субпіксельну точність відновлення координат.

#### **Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:**

1. Провести аналіз особливостей просторово-розріджених даних, отриманих за допомогою БПЛА, та виявити недоліки традиційних геостатистичних методів під час роботи з високочастотним пуасонівським шумом.

2. Розробити процедуру попередньої обробки даних, що включає інтерполяцію методом природних сусідів для відновлення безперервної топології радіаційного поля та адаптивну фільтрацію для підвищення співвідношення «сигнал/шум».

3. Обґрунтувати та реалізувати двоетапний алгоритм пошуку джерел, який поєднує

перетворення Хафа для грубої оцінки зон інтересу та алгебраїчний метод Таубіна для субпіксельного уточнення координат центрів аномалій.

4. Виконати чисельне моделювання для кількісної оцінки точності методу та провести апробацію розробленого алгоритмічного забезпечення на реальних даних моніторингу ділянки «Пісочне плато» (Чорнобильська зона відчуження).

### 3. Матеріали та методи

#### 3.1. Методологія збору даних

Методологія збору даних базується на систематичній організації вимірювань, що включає планування маршрутів, вибір точок та кроків дискретизації. Такий підхід спрямований на зниження невизначеностей через контроль умов та повторні заміри, оптимізацію ресурсів і підвищення точності локалізації за безумовного дотримання безпеки персоналу.

##### *Планування місії та параметри польоту*

Аерорадіометричне дослідження проводиться на регулярній сітці вздовж паралельних ліній («галсів»). Ключовим параметром сканування є ширина ліній, яка визначає компроміс між часом сканування та просторовою роздільною здатністю. Для кількісного визначення «повного покриття» території припускається, що детектор має поле зору у вигляді конуса  $90^\circ$ . За цієї умови ширина смуги сканування вдвічі перевищує висоту польоту.

Для оперативного пошуку радіаційних джерел зазвичай використовуються такі параметри: інтервал між галсами – від 10 м до 30 м, зв'язкові лінії для режиму «зшивання» застосовують прольоти перпендикулярно лініям польоту (відстань між ними приблизно в 5 разів перевищує інтервал галсів), швидкість БПЛА становить близько 1–5 м/с, час експозиції (вибірки) – гамма-спектрометричні дані отримують з інтервалом 1 с.

Для забезпечення високої роздільної здатності необхідні платформи, здатні працювати на низьких висотах. Висота польоту обмежується топографією, майстерністю пілота та вимогами безпеки. Збільшення висоти призводить до розмиття сигналу на карті, тому план польоту регулюється так, щоб забезпечити невелике перекриття полів зору детектора.

##### *Сценарій експерименту та формат даних*

У межах цього дослідження розглядається зона пошуку у вигляді прямокутника розміром  $M \times N$  м. Установлено такі фіксовані параметри місії: висота польоту – 13 м, швидкість БПЛА – 5 м/с, початкова точка – визначається стартовим положенням БПЛА.

Первинні дані радіаційної розвідки формуються у вигляді масиву геоприв'язаних

вимірювань  $D = \{(x_i, y_i, z_i)\}$ , де  $(x_i, y_i)$  – географічні координати точки виміру, а  $z_i$  – інтенсивність гамма-випромінювання. Після закінчення сканування дані експортуються для подальшого аналізу.

#### 3.2. Математична модель поля

Інтерпретація зібраних даних вимагає урахування стохастичної природи радіоактивного розпаду та складної топології поля. Метою моделювання є розрізнення сигналу джерела від випадкових фонових коливань (шуму) та ідентифікація локальних максимумів.

Процес реєстрації випромінювання підпорядковується закону розподілу Пуассона. Імовірність фіксації детектором  $n$  імпульсів за час експозиції  $t$  за умови середньої швидкості лічби  $\mu$  визначається виразом:

$$P(n, t) = \frac{(\mu \cdot t)^n}{n!} e^{-(\mu \cdot t)} \quad (1)$$

Ширина розподілу Пуассона визначається як  $\sqrt{\mu \cdot t}$ . За відомого середнього очікуваного фону  $\mu_s$ , сигналу  $\mu_s$  і часу впливу  $t$  можна встановити граничне значення відліків, що задовольнить необхідний рівень достовірності результату пошуку.

Просторовий розподіл інтенсивності радіаційного поля характеризується значною варіативністю градієнтів. Локальні максимуми можуть бути сформовані як окремими об'єктами, так і суперпозицією випромінювання від кількох джерел. Оскільки кумулятивний радіаційний ефект має складну структуру, його апроксимація простою унімодальною функцією (1) є некоректною.

Для адекватного моделювання такого поля доцільно застосовувати гауссову модель суміші (Morelande & Skvortsov, 2009). Нехай  $f: R^2 \rightarrow R$  позначає функцію поля, де  $f(x)$  – вимір радіаційного поля в точці  $x$ . Кожний вимір  $y_i = f(x_i)$  розподіляється незалежно. Поле випромінювання описується множинною гауссовою сумішшю:

$$F(x, \alpha, \mu, \sigma) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \phi\left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i}\right), x \in R^2, \quad (2)$$

де  $\phi(x)$  – функція густини нормального розподілу:

$$\phi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) / (2\pi)$$

Тут  $\mu_1, \dots, \mu_M$  – середні значення (координати центрів джерел),  $\sigma_1, \dots, \sigma_M$  – дисперсії (просторові параметри джерел), а  $\alpha_1, \dots, \alpha_M$  – ваги змішування, що описують внесок кожної компоненти. Ваги невід'ємні й у сумі дорівнюють одиниці.

Складність задачі полягає у тому, що регіон може мати високі значення інтенсивності через накладання полів (суперпозицію) або близьке

розташування потужних джерел (приклад складного розподілу наведено на рис. 1, ділянка «Піщане плато»). Тому виявлення окремих джерел без апіорної інформації про їхні параметри вимагає застосування спеціалізованого алгоритмічного конверсу

### 3.3. Запропонований алгоритмічний конверс

Специфіка аерогамама-зйомки полягає у дискретному характері збору інформації. Як показано на рис. 1, первинний масив даних є просторово нерівномірним: висока щільність вимірювань спостерігається вздовж траєкторії польоту, тоді як між сусідніми галсами залишаються значні зони без даних. Така структура вибірки унеможливує використання простих матричних операцій без попередньої реконструкції поля.

Процедура локалізації джерел іонізуючого випромінювання реалізована як послідовний конверс, що складається з п'яти етапів: 1) відновлення безперервного поля; 2) придушення стохастичного шуму; 3) виділення градієнтних зон (ізодоз); 4) груба локалізація областей інтересу; 5) субпіксельне уточнення координат. Загальна схема алгоритму представлена як ланцюжок: [Первинні дані БПЛА] -> [Інтерполяція методом природних сусідів] -> [Гауссове згладжування] -> [Детектор границь Canny] -> [Перетворення Хафа (виділення області дослідження)] -> [Уточнення методом Таубіна] -> [Координати джерел].

#### Етап 1: Реконструкція поля методом природних сусідів

Вхідними даними є набір дискретних вимірювань  $D = \{(x_i, y_i, z_i)\}$ , отриманих уздовж траєкторії

польоту БПЛА. Оскільки дані є просторово розрідженими (відстань між галсами значно перевищує крок вимірювання вздовж галсу), застосування стандартних методів, таких як IDW або триангуляція Делоне, призводить до появи артефактів («ефект сходинок»).

Для уникнення цього вибрано метод інтерполяції природних сусідів (Watson, 1992). Значення у довільній точці  $P$  обчислюється на основі площ перетину полігонів Вороного:

$$f(P) = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i}, \quad (3)$$

де  $w_i$  – нормована вага, що відповідає частці площі, яку «відбирає» нова точка у комірки  $i$ -го сусіда.

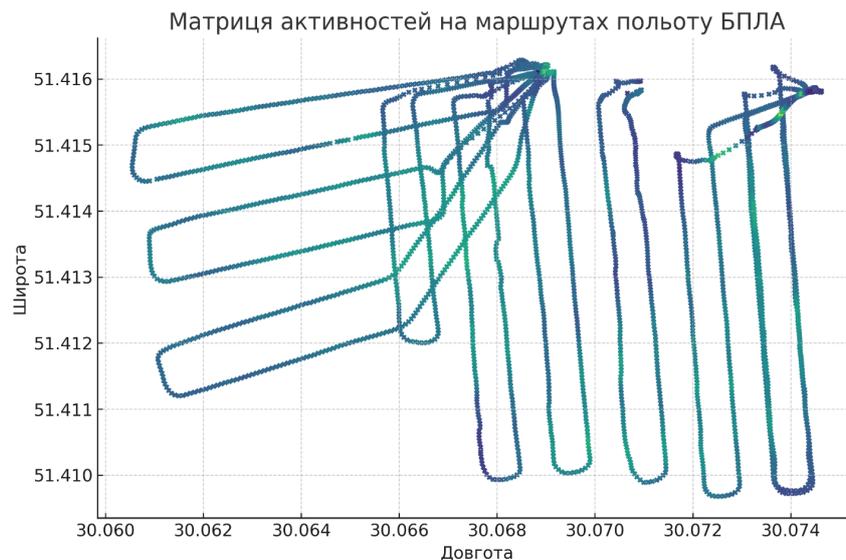
Цей метод є адаптивним до локальної щільності точок треку і гарантує гладкість відновленої поверхні, що є критичним для коректного обчислення градієнтів на наступних етапах.

#### Етап 2: Адаптивна фільтрація шуму

Оскільки радіаційні вимірювання підпорядковуються статистиці Пуассона, сирі дані містять високочастотний стохастичний шум. Для його придушення застосовано фільтр Гауса з ядром  $G(x, y)$ :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)}, \quad (4)$$

де параметр  $\sigma$  (стандартне відхилення) вибирається емпірично виходячи з висоти польоту  $H$ . Радіус згладжування має корелювати з полем зору детектора ( $\approx 2H$ ), щоб відфільтрувати локальні флуктуації, не спотворюючи глобальну структуру поля.



**Рис. 1.** Візуалізація просторової дискретизації вимірювань інтенсивності випромінювання вздовж траєкторії польоту БПЛА (первинні «сирі» дані)

**Fig. 1.** Visualization of spatial discretization of radiation intensity measurements along the UAV flight path (primary «raw» data)

### Етап 3: Виділення ізодозисних контурів

Для ідентифікації меж радіаційних аномалій використовується детектор країв Canny (Canny, 1986). На відміну від класичних задач комп'ютерного зору, де шукають різкі межі, радіаційне поле має дифузний характер. Тому порогові значення гістерезису ( $T_{low}$ ,  $T_{high}$ ) встановлюються адаптивно низькими, що дає змогу виявляти слабкі градієнтні переходи, характерні для периферії радіаційної плями, ігноруючи фоновий шум.

### Етап 4: Локалізація методом перетворення Хафа

Замість пошуку локальних максимумів, які є нестійкими в умовах шуму, застосовано перетворення Хафа для кіл (Duda & Hart, 1972). Алгоритм працює як механізм голосування в просторі параметрів ( $a$ ,  $b$ ,  $r$ ):

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (5)$$

де кожна точка контуру голосує за можливі центри джерела ( $a$ ,  $b$ ). Це дає змогу робастно ідентифікувати джерело, навіть якщо контур ізодози є розірваним або частково спотвореним через пропуски у даних БПЛА.

### Етап 5: Субпіксельне уточнення координат

Перетворення Хафа дає координати з точністю до кроку дискретизації акумулятора. Для досягнення субпіксельної точності застосовується алгебраїчний метод Таубіна (Taubin, 1991).

Метод мінімізує наближену геометричну відстань від точок до ідеального кола:

$$\sum_i F(x_i, y_i)^2 / (4 \cdot \sum_i F(x_i, y_i)) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $F(x_i, y_i)$  – алгебраїчна відстань. На відміну від методу найменших квадратів метод Таубіна є статистично незміщеним і дає змогу отримати аналітичний розв'язок задачі у вигляді власних значень матриці моментів, забезпечуючи високу точність локалізації епіцентру.

## 4. Експерименти та результати

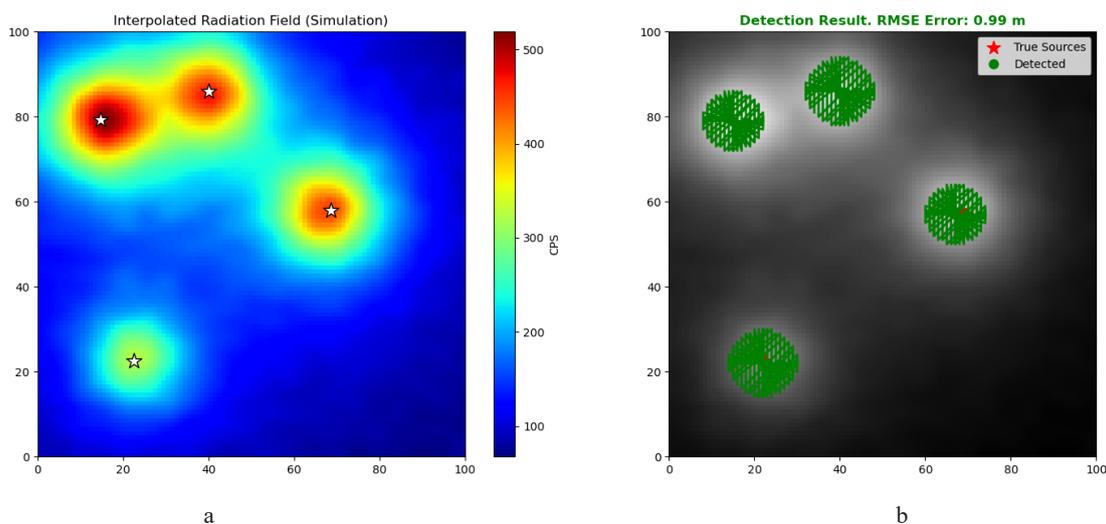
### 4.1. Чисельне моделювання

Для кількісної оцінки точності запропонованого алгоритму було проведено серію експериментів із використанням методу Монте-Карло. Було згенеровано синтетичне радіаційне поле розміром  $100 \times 100$  м з чотирма точковими джерелами різної інтенсивності (від 25 000 до 45 000 cps). Процес вимірювання імітував політ БПЛА на висоті 10 м з кроком між галсами 5 м із накладанням пуассонівського шуму для відтворення реальних умов детектування.

Результати моделювання (рис. 2) демонструють високу ефективність запропонованого гібридного підходу (Hough Transform + Canny Edge Detection). Алгоритм успішно локалізував усі чотири джерела, ігноруючи стохастичні флуктуації фону. Розрахована середньоквадратична похибка локалізації (RMSE) становила 0.99 м, що свідчить про високу точність методу під час обробки розріджених даних.

### 4.2. Апробація на реальних даних

Ефективність розробленого підходу було перевірено на натурних даних, отриманих у рамках моніторингу ділянки «Піщане плато» (Чорнобильська зона відчуження). Моніторинг проводився за допомогою БПЛА на висоті 13 м зі швидкістю 5 м/с.



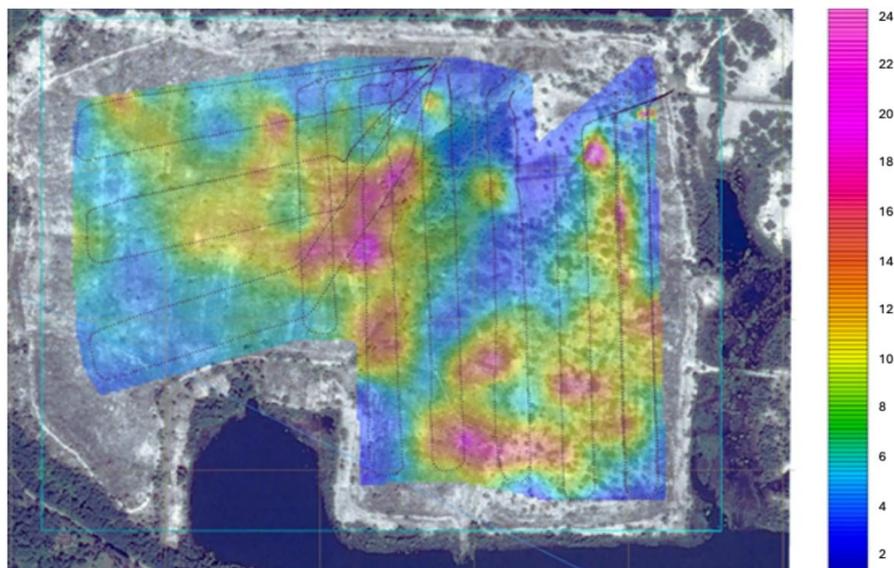
**Рис. 2.** Результати чисельного моделювання роботи алгоритму локалізації методом Монте-Карло: а) інтерпольоване поле інтенсивності випромінювання (cps) із накладеним пуассонівським шумом; б) результат роботи детектора (зелені маркери) порівняно з істинним положенням джерел (зірки). Середньоквадратична похибка локалізації (RMSE) становить 0.99 м

**Fig. 2.** Results of numerical simulation of the localization algorithm using the Monte Carlo method: a) interpolated radiation intensity field (cps) with superimposed Poisson noise; b) the result of the detector operation (green markers) compared to the true position of the sources (stars). The root mean square localization error (RMSE) is 0.99 m

На рис. 3 наведено картограму просторового розподілу потужності дози, відновлену за допомогою запропонованого алгоритмічного конвеєру. Як видно з результатів, метод дав змогу чітко локалізувати зони підвищеної радіоактивності, нівелювавши вплив нерівномірності треків польоту.

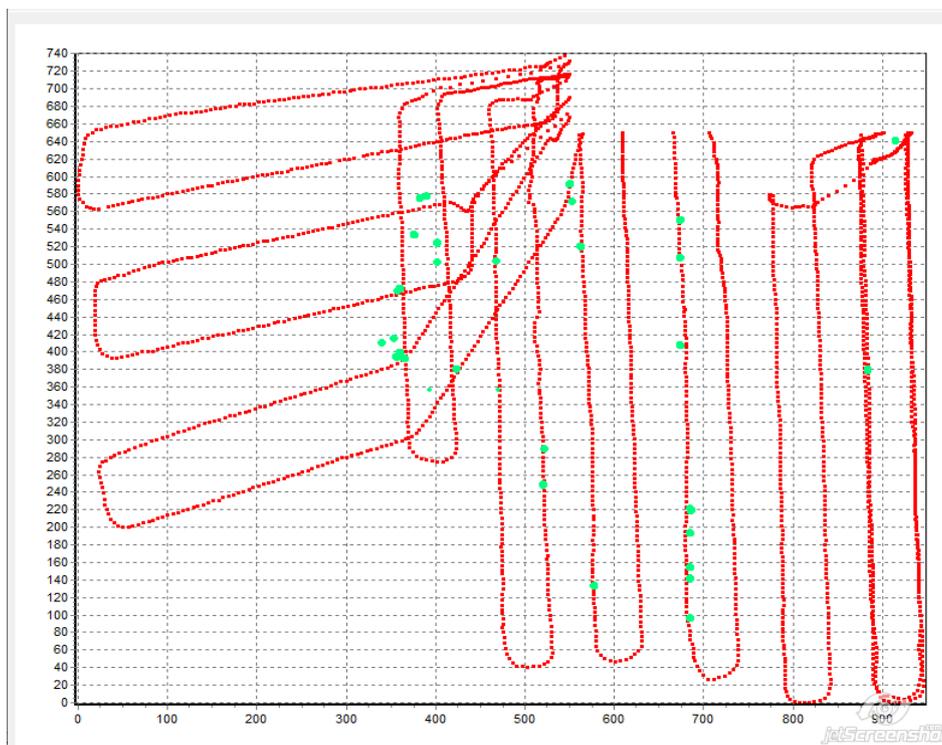
Результати локалізації джерел на ділянці «Піщане плато» з використанням перетворення Хафа наведено на рис. 4.

У табл. 1 приведено центри кіл  $(i, j)$  радіуса 2 м та їхні географічні координати. Передбачається, що у цих точках будуть знаходитися джерела радіаційного випромінювання.



**Рис. 3.** Картограма просторового розподілу потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання на ділянці «Піщане плато» (Чорнобильська зона відчуження), отримана за результатами натурних випробувань. Пунктирними лініями позначено траєкторію польоту БПЛА

**Fig. 3.** Cartogram of the spatial distribution of the equivalent dose power of gamma radiation in the «Sandy Plateau» area (Chernobyl Exclusion Zone), obtained based on the results of field tests. The dashed lines indicate the flight path of the UAV



**Рис. 4.** Маршрути обстеження та локалізовані радіоактивні джерела (виділені зеленим кольором)

**Fig. 4.** Survey routes and localized radioactive sources (highlighted in green)

**Таблиця 1.** Координати локалізованих джерел іонізуючого випромінювання, визначені за результатами роботи алгоритму

**Table 1.** Coordinates of localized sources of ionizing radiation determined by the results of the algorithm

№ з/п	Матрична координата i	Матрична координата j	Широта, (°)	Довгота, (°)
1	410	340	51.410500	30.061905
2	415	354	51.410507	30.061960
3	394	357	51.410465	30.061974
4	469	358	51.410618	30.061977
5	399	360	51.410477	30.061985
6	472	361	51.410622	30.061989
7	392	366	51.410461	30.062010
8	533	376	51.410744	30.062050
9	575	383	51.410828	30.062077
10	577	390	51.410831	30.062105
11	502	402	51.410683	30.062153
12	524	402	51.410728	30.062153
13	380	424	51.410439	30.062241
14	503	468	51.410686	30.062416
15	248	521	51.410175	30.062630
16	289	522	51.410255	30.062634
17	591	551	51.410862	30.062750
18	571	553	51.410820	30.062757
19	520	563	51.410721	30.062798
20	133	578	51.409946	30.062857
21	407	674	51.410492	30.063240
22	507	674	51.410694	30.063240
23	550	674	51.410778	30.063240
24	96	685	51.409870	30.063286
25	141	685	51.409962	30.063286
26	154	685	51.409988	30.063286
27	193	685	51.410065	30.063286
28	221	685	51.410122	30.063286
29	219	686	51.410118	30.063290
30	379	884	51.410439	30.064081
31	640	915	51.410957	30.064205
32	640	915	51.410957	30.064205

## 5. Обговорення

### 5.1. Інтерпретація точності локалізації

Отримане в результаті чисельного моделювання значення середньоквадратичної похибки (RMSE = 0.99 м) демонструє високу ефективність запропонованого алгоритмічного конверсу. У контексті аеророзвідки цей результат слід оцінювати відносно висоти польоту БПЛА ( $H$ ). За висоти сканування 10–13 м абсолютна похибка локалізації становить менше 10% від висоти польоту.

Така точність досягається завдяки інтеграції методу Таубіна на фінальному етапі обробки. Якщо класичне перетворення Хафа обмежене дискретністю акумуляторної сітки (що зазвичай дає похибку в межах 1–2 м залежно від кроку grid step), то алгебраїчне уточнення дає змогу перейти до субпіксельного рівня, компенсуючи дискретність вхідних даних.

### 5.2. Обчислювальна ефективність та порівняння з аналогами

Критичною перевагою розробленого геометричного підходу є його швидкість. Існуючі ймовірнісні методи, такі як байєсівські фільтри частинок або регресія гаусівських процесів, хоча і забезпечують високу точність, вимагають значних обчислювальних ресурсів та ітеративного перерахунку щільності ймовірності для всієї карти.

Натомість запропонований гібридний алгоритм (Canny + Hough) базується на детермінованих операціях матричної алгебри, які легко піддаються розпаралелюванню. Це дає змогу реалізувати обробку даних у режимі квазіреального часу навіть на бортових мікрокомп'ютерах БПЛА з обмеженим енергоспоживанням, що є вирішальним фактором для систем оперативного реагування на радіаційні аварії.

### 5.3. Обмеження методу

Попри високу точність для ізованих джерел, метод має природні фізичні обмеження, пов'язані з роздільною здатністю. Оскільки для придушення пуассонівського шуму використовується фільтрація Гауса з параметром  $\sigma$ , це призводить до певного розмиття градієнтних меж.

У разі коли два точкові джерела розташовані на відстані, меншій за діаметр плями розмиття (залежить від  $\sigma$  та висоти польоту), алгоритм може інтерпретувати їх як єдину радіаційну аномалію з усередненим центром мас. Це класична проблема дифракційної межі у задачах відновлення зображень. Для розділення таких джерел у майбутніх дослідженнях доцільно розглянути адаптивне зменшення висоти польоту в зонах виявлених аномалій.

## 6. Висновки

У роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу високоточної локалізації джерел іонізуючого випромінювання за даними мобільного моніторингу. Основні результати дослідження полягають у такому. Запропоновано новий гібридний алгоритмічний конверс, що інтегрує методи комп'ютерного зору (детектор Canny, перетворення Хафа) з алгебраїчними методами апроксимації (метод Таубіна). Цей підхід дав змогу подолати проблему стохастичного шуму та просторової розрідженості даних, характерну для аерогамама-зйомки. Чисельне моделювання методом Монте-Карло підтвердило високу ефективність розробленого методу. В умовах імітації пуассонівського шуму досягнуто субпіксельну точність локалізації із середньоквадратичною похибкою RMSE = 0.99 м, що значно перевищує точність стандартних методів пошуку локальних максимумів. Працездатність алгоритму

підтверджено на реальних експериментальних даних, отриманих із БПЛА на ділянці «Піщане плато» у Чорнобильській зоні відчуження. Метод успішно відновив структуру радіаційного поля та ідентифікував зони аномалій, нівелювавши вплив нерівномірності траєкторії польоту.

Завдяки відсутності складних ітераційних обчислень запропонований геометричний підхід характеризується високою швидкістю. Це відкриває перспективи його вбудовування безпосередньо в бортові комп'ютери БПЛА для автономного виявлення радіаційних загроз та коригування польотних місій у режимі реального часу.

#### Література

- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698.
- Chen, C. M., Sinclair, L. E., Fortin, R., Coyle, M., & Samson, C. (2020). In-flight performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARUO). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 954, 161609.
- Chilès, J. P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons.
- Czaja, B., Maslanka, K., Skokowski, P., & Kelner, J. (2025). Overview of mutual localization methods between UAVs in a swarm. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 19.
- Dubois, G. (2008). Advances in automatic interpolation for real-time mapping. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(5), 597–599.
- Dubois, P. (2024). *Methods for automatization of radiotherapy treatment planning* [Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay].
- Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1), 11–15.
- Kasperek, D., & Podpora, M. (2024). Optimizing geospatial data for ML/CV applications: A Python-based approach. *Applied Sciences*, 14(24).
- Khomutinin, Yu. V., Levchuk, S. Ye., Protsak, V. P., & Kashparov, V. O. (2020). Kartohrafuvannya radioaktyvnoho zabrudnennia iz zadanyim rivnem doviry [Mapping of radioactive contamination with a given level of confidence]. *Nuclear Physics & Atomic Energy*, 21(3).
- Lin, S., Ning, S., Zhu, H., & others. (2024). Neural network methods for radiation detectors and imaging. *Frontiers in Physics*, 12, 1334298.
- Martin, P. G., Payton, O. D., Fardoulis, J. S., Richards, D. A., Yamashiki, Y., & Scott, T. B. (2016). 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 12–19.
- Morelande, M. R., & Skvortsov, A. (2009). Radiation field estimation using a Gaussian mixture. In *Proceedings of the 12th International Conference on Information Fusion* (pp. 2247–2254).
- Nosenko, T., & Mashkina, I. (2025). Modeliuvannya protsesiv obrobky ekolohichnykh danykh dlia system mobilnoho monitoringu na osnovi BPLA ta metodu IDW [Modeling of environmental data processing processes for UAV-based mobile monitoring systems and IDW method]. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 2(30), 110–124.
- Opanasiuk, B. M., & Mokin, V. B. (2025). *Rozrobka informatsiinoi tekhnologii heostatystychnoho analizu radiatsiinoho zabrudnennia v Yevropi* [Development of information technology for geostatistical analysis of radiation pollution in Europe] [Doctoral dissertation, VNTU].
- Popov, O., Bondar, O., Ivaschenko, T., & others. (2023). Features of the modern UAV-based complexes use to solve radiation control problems. In *Systems, Decision and Control in Energy IV* (pp. 35–57). Springer.
- Taubin, G. (1991). Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11), 1115–1138.
- Trysnyuk, V. M., & Nagorni, Ye. I. (2024). Vykorystannia metodiv interpolatsii dlia obrobky danykh radiatsiinoi rozvidky [Use of interpolation methods for processing radiation reconnaissance data]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii*, 1, 73–78.
- Trysnyuk, V., Nagorni, E., Trysnyuk, T., Konetska, O., & Kurilo, A. (2022). Metodyka vyvliennia radiatsiinoho zabrudnennia mistsevosti ta yoho ryzykiv [Methodology for detecting radiation contamination of the area and its risks]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 3(69), 112–115.
- Watson, D. F. (1992). *Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data*. Pergamon Press.
- West, A., Tsitsimpelis, I., Licata, M., & others. (2021). Use of Gaussian process regression for radiation mapping of a nuclear reactor with a mobile robot. *Scientific Reports*, 11(1), 13975.
- Xu, S., Hou, Z., Wei, C., & others. (2026). Real-time radiation noise suppression and dose detection method based on FPGA with comparative analysis with deep learning methods. *Expert Systems with Applications*, 295, 128906.

#### SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF LOCALIZING IONIZING RADIATION SOURCES USING COMPUTER VISION METHODS: FROM THE HOUGH TRANSFORM TO SUB-PIXEL REFINING

Zabulonov Yu.L., Burtnyak V.M., Arhipenko O.M., Zlobenko B.P., Nosenko T.I., 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

**Arhipenko O.M.**, Researcher, State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», ORCID: 0000-0003-0955-3704, scerarcis@gmail.com

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

**Nosenko T.I.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, ORCID: 0000-0002-7597-9861, t.nosenko@kubg.edu.ua

**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

*The paper considers the current problem of operational search and localization of lost sources of ionizing radiation using unmanned aerial vehicles (UAVs). Traditional methods of radiation reconnaissance face the challenges of processing sparse spatial data and a high level of stochastic noise characteristic of airborne detectors. The aim of the paper is to develop a stable (robust) algorithmic support for automated reconstruction of radiation fields and high-precision identification of anomalies.*

*A hybrid approach is proposed that adapts computer vision methods for radioecological monitoring tasks. The data processing methodology includes: spatial interpolation using the natural neighbor method to restore the continuous topology of the field; adaptive Gaussian filtering to minimize Poisson noise; gradient contour extraction using the Canny detector. The key stage is the application of the Hough transform to detect the centers of radiation anomalies, the parameters of which are additionally refined by the algebraic Taubin method to achieve subpixel accuracy.*

*The validation of the proposed approach was carried out by numerical modeling with simulation of real flight conditions and statistical characteristics of decay. The experimental results demonstrated the high accuracy of the algorithm: the root mean square localization error (RMSE) was 0.99 m. The effectiveness of the method was also confirmed on field data obtained during monitoring of the «Sandy Plateau» area in the Chernobyl Exclusion Zone. It is proven that the developed approach allows to localize sources in quasi-real time, which makes it an effective tool for radiation threat response systems.*

**Key words:** UAV; radiation monitoring, Hough transform, Taubin method, source localization, sparse data processing, computer vision.