

## ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СТРУКТУР ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-140-146

УДК 528.7:614.8

<sup>1</sup>Бас Олег Володимирович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-2401-9457>

<sup>1</sup>Мирошник Олег Миколайович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0001-8951-9498>

<sup>2</sup>Федоров Олексій Валерійович

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

<sup>1</sup>Харченко Сергій Олександрович

<https://orcid.org/0009-0005-3071-966X>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 10.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 05.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

### МЕТОДИКА НАТУРНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ОСЕРЕДКУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ ЗА ДАНИМИ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З БПЛА DJI MAVIC 3

У статті обґрунтовано методику натурної верифікації аналітичного методу оперативного визначення площі осередку надзвичайної ситуації природного характеру. Метод ґрунтується на геометричній моделі проєкції кадру на горизонтальну поверхню місцевості з урахуванням висоти БПЛА та кута нахилу оптичної осі камери. На відміну від спрощених підходів, у роботі деталізовано не лише формули для визначення загальної площі проєкції кадру, а й математичну схему розрахунку площ окремих зон у режимі похилого знімання коли проєкція набуває трапецієподібної форми. Сформульовано наукову гіпотезу дослідження, визначено критерії прийнятності та показники статистичного оцінювання результатів. Описано вимоги до контрольного полігону, план експерименту, порядок польотів, процедуру опрацювання результатів та систему обчислення похибок. Запропоновано підхід до врахування невизначеностей висоти, кута підвісу та параметрів поля зору, а також порядок введення корекційних коефіцієнтів у разі виявлення систематичних відхилень. Практичне значення розробленої методики полягає у створенні відтворюваної процедури перевірки придатності аналітичного методу для оперативного застосування підрозділами цивільного захисту безпосередньо в районі надзвичайної ситуації.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, аерофотознімання, осередок надзвичайної ситуації, моделювання, площа зони ураження, натурна верифікація, геометрична модель проєкції, DJI Mavic 3, оперативне реагування.

#### Вступ

Оперативне визначення просторових параметрів осередку надзвичайної ситуації природного характеру є одним із ключових елементів інформаційного забезпечення реагування. На основі розрахунків площі зони надзвичайної ситуації, що пов'язані зі підтоплення, торф'яною або лісовою пожежею визначається обсяг сил і засобів необхідних для ліквідації, отримані дані слугують підставою для прогнозування розвитку події [1, 2, 3]. За умов дефіциту часу традиційні наземні способи вимірювання є або надто повільними, або

небезпечними для застосування безпосередньо в осередку події.

БПЛА суттєво розширили можливості первинної оцінки обстановки в районі надзвичайної ситуації. Втім практична цінність аерофотознімка визначається не самим фактом отримання зображення, а наявністю формалізованого методу переходу від параметрів кадру до реальних лінійних і площинних характеристик місцевості. Саме тому в попередніх напрацюваннях авторів запропоновано аналітичний метод оцінювання площі осередку надзвичайної ситуації за одиночним аерознімком із БПЛА DJI Mavic 3,

побудований на геометрії центральної проєкції та зонувани кадрі [4–8].

Проте теоретична коректність геометричних залежностей ще не є достатньою підставою для практичного застосування. Щоб метод міг реально використовуватися підрозділами цивільного захисту, необхідно встановити, у яких режимах знімання аналітична модель забезпечує прийнятну точність, які чинники формують систематичні й випадкові відхилення та чи потребує метод калібрування для конкретної моделі БпЛА. Саме тому необхідно провести натурний експеримент із чітко регламентованою процедурою, яка передбачатиме перевірку працездатності даного методу.

Застосування БпЛА для картографування, дистанційного зондування та підтримки рішень у кризових умовах упродовж останніх десяти років стало самостійним напрямом досліджень. У фундаментальному огляді Colomina та Molina показано, що безпілотні авіаційні системи сформували окремий прикладний сегмент фотограмметрії та дистанційного зондування, де поєднання мобільності, гнучкості маршруту й високої просторової роздільної здатності дає переваги, недсяжні для традиційних засобів спостереження [4]. Rajares, розглядаючи застосування UAV у дистанційному зондуванні, дійшов висновку, що в оперативних сценаріях вирішальною часто є не абсолютна точність, а можливість швидко отримати метрично придатну оцінку без камерального опрацювання [5].

У сфері цивільного захисту України питання використання БпЛА для спостереження та оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій досліджували Мосов С. В., Хижняк В. В., Литовченко А. О., Ядченко Д. В. та ін., обґрунтувавши функції безпілотної авіації при реагуванні на події та підтримці оперативних служб [1, 2, 3]. Прикладні аспекти, а саме рух БпЛА в зоні надзвичайної ситуації, технічний зір, протимінна діяльність висвітлено в роботах Ковальова О. О., Неклонського І. М., Ткачука А. Г., Кравчука А. Р., Баса О. В., Давиденка М. М. [11, 12, 13]. Ці дослідження утворюють важливу прикладну базу, однак жодне з них не розв'язує задачу швидкого визначення площі осередку НС за одним кадром без побудови фотограмметричної моделі місцевості.

Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні й світі в контексті завдань цивільного захисту аналізували Лаврівський М. З. та Гавриш А. П. [14]; методи керування БпЛА і їхній вплив на точність вимірювальних завдань розглядали Микійчук М. М. і Зіганшин Н. С. [15]. Перспективний напрям автоматизації визначення коефіцієнтів заповнення  $\eta$  при зональній оцінці площі окреслено в роботі Стасенка Д. В. та Яковини В. С. через методи навігації БпЛА із застосуванням штучного інтелекту [16].

Геометрична основа методу спирається на класичні положення фотограмметрії, викладені у Wolf et al. та Luhmann et al. [7, 8]. Під час знімання,

коли камера спрямована вертикально вниз зв'язок між висотою польоту, кутом поля зору і розмірами наземної проєкції добре описується аналітичними залежностями. Однак у режимі похилого знімання, особливо при малих висотах, суттєво зростає чутливість до похибок кута підвісу й висоти, а спрощене припущення про рівність зон кадру перестав виконуватися в наземних координатах. Термінологічну та методологічну основу дистанційного зондування в Україні встановлено

ДСТУ 4220-2003 [6]; технічні характеристики камери DJI Mavic 3 наведено у специфікації виробника [9]; власні попередні напрацювання авторів із верифікації методів ідентифікації об'єктів БпЛА описано в [10].

Проте незважаючи на широке охоплення загальних питань застосування БпЛА в надзвичайних умовах, у науковій літературі відсутня відтворювана методика натурної верифікації оперативного методу визначення площі осередку НС, яка враховувала б зональну структуру проєкції.

### Матеріали та методи

У роботі застосовано комплекс взаємопов'язаних методів: аналітичне геометричне моделювання, методи прикладної фотограмметрії та статистичного аналізу, методи проведення натурального експерименту.

Теоретичну основу методу становить модель центральної проєкції кадру на горизонтальну поверхню місцевості [7, 8]. Положення камери описується двома параметрами: висотою  $H$  над опорною поверхнею та кутом нахилу  $\gamma$  підвісу відносно вертикалі. Якщо місцевість у межах одного кадру має локальний перепад висот  $\Delta h$ , у розрахунках використовується ефективна висота знімання  $H_{ef} = H - \Delta h$ ; за горизонтальної поверхні  $H_{ef} = H$ .

Параметри поля зору камери DJI Mavic 3 діагональний кут  $\varphi d = 84^\circ$  та роздільна здатність  $5280 \times 3956$  пікс. [9], перераховуються в половинні кути поля зору:  $\beta_x \approx 35,8^\circ$  (поперечний) та  $\beta_y \approx 28,35^\circ$  (поздовжній). Ці значення є сталими параметрами моделі й не змінюються між режимами знімання.

Метод реалізує дві розрахункові схеми залежно від кута нахилу камери.

Режим вертикального знімання відповідає положенню  $\gamma = -90^\circ$ , за якого кут відхилення оптичної осі від вертикалі  $\alpha = 90^\circ - |\gamma| = 0^\circ$ . Проєкція кадру на місцевість наближається до прямокутника, а її розміри та площа визначаються формулами:

$$H_{ef} = H - \Delta h, \quad (1)$$

$$B_0 = 2H_{ef} \tan \beta_x, \quad (2)$$

$$L_0 = 2H_{ef} \tan \beta_y, \quad (3)$$

$$S_0 = 4H_{ef}^2 \tan \beta_x \tan \beta_y, \quad (4)$$

Режим похилого знімання відповідає  $\gamma > -90^\circ$ , тобто  $\alpha > 0^\circ$ . За цих умов ближня і дальня межі кадру мають різні поздовжні координати, а форма

проекції є трапецієподібною. Поздовжні координати меж:

$$x_1 = H_{\text{эф}} \tan(\alpha - \beta_y), \quad (5)$$

$$x_2 = H_{\text{эф}} \tan(\alpha + \beta_y), \quad (6)$$

Поздовжній розмір проекції:

$$L = x_2 - x_1. \quad (7)$$

Похили відстані від центра проекції до ближньої та дальньої меж:

$$R_1 = \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_1^2}, \quad (8)$$

$$R_2 = \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_2^2}, \quad (9)$$

Ширини кадру по межах і площа трапецієподібною проекції:

$$B_1 = 2R_1 \tan \beta_x, \quad (10)$$

$$B_2 = 2R_2 \tan \beta_x, \quad (11)$$

$$S = \frac{B_1 + B_2}{2} L, \quad (12)$$

У спрощених підходах площа осередку НС оцінювалася через рівновеликий поділ кадру на 9 комірок:  $S_{j,k} = S_0/9$ . Для вертикального режиму таке наближення є прийнятним і усі комірки мають однакові наземні площі. Для похилого режиму рівність комірок у наземних координатах не виконується: дальній пояс охоплює значно більшу площу, ніж ближній. З цієї причини в роботі запроваджено уточнену схему зонування.

Нормована вертикальна координата  $v$  системи зображення визначається в інтервалі  $[-1; 1]$ . Межі трьох горизонтальних поясів задаються виразом:

$$v_j = -1 + \frac{2j}{3}, j = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Поздовжня координата  $j$ -ї межі на місцевості:

$$x_j = H_{\text{эф}} \cdot \tan(\alpha + \arctan(v_j \cdot \tan \beta_y)). \quad (14)$$

Ширина кадру на  $j$ -й межі:

$$B_j = 2 \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_j^2} \tan \beta_x, \quad (15)$$

Площа  $j$ -го горизонтального поясу (трапеція між межами  $j$  і  $j+1$ ):

$$A_j = \frac{B_j + B_{j+1}}{2} (x_{j+1} - x_j), j = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Оскільки кожна з трьох вертикальних смуг кадру займає рівну частку його ширини (1/3), площа окремої комірки ( $j, k$ ) в першому наближенні дорівнює:

$$S_{j,k} = A_j / 3, \quad k = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Орієнтовна площа осередку НС обчислюється як зважена сума площ комірок:

$$S_{\text{НС}} = \sum \sum \eta_{j,k} \cdot S_{j,k}, \quad (18)$$

де  $\eta_{j,k} \in [0,1]$  – коефіцієнт заповнення комірки осередком НС, що визначається оператором візуально або автоматизовано засобами комп'ютерного зору [16].

Формули (16) – (17) усувають концептуальну похибку рівновеликого зонування трапецієподібною проекції й підвищують математичну коректність методу при похилому зніманні.

Аналітична модель використовує виміряні або телеметрично отримані параметри  $H_{\text{эф}}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_x$ ,  $\beta_y$ , тому точність результатів безпосередньо залежить від похибок цих величин. Для вертикального режиму відносна комбінована невизначеність площі у першому наближенні:

$$u_r(S_0) \approx \sqrt{\left(2 \frac{u(H_{\text{эф}})}{H_{\text{эф}}}\right)^2 + \left(\frac{\sec^2 \beta_x}{\tan \beta_x} u(\beta_x)\right)^2 + \left(\frac{\sec^2 \beta_y}{\tan \beta_y} u(\beta_y)\right)^2}. \quad (19)$$

Для похилого режиму аналітичний вираз є складнішим через нелінійну залежність від  $\alpha$ , тому оцінка проводиться числовим варіюванням вхідних параметрів у межах їхніх похибок (метод чутливості):  $\delta H = \pm 0,1$  м,  $\delta \gamma = \pm 1^\circ$ ,  $\delta \varphi d = \pm 0,5^\circ$ . За результатами такого аналізу встановлюється, які параметри найбільше впливають на похибку і потребують першочергового контролю під час польоту.

Натурні випробування проводяться із застосуванням такого комплексу обладнання:

БПЛА DJI Mavic 3 з основною ширококутною камерою ( $\varphi d = 84^\circ$ ,  $5280 \times 3956$  пікс.) [9] – основний вимірювальний засіб;

мобільний додаток DJI Fly – керування польотом, контроль висоти та кута підвісу за телеметрією;

рулетка з діапазоном не менше 30 м і ціною поділки 1 мм – наземні вимірювання контрольного полігону;

контрастні тканинні мітки розміром не менше  $0,5 \times 0,5$  м – маркування кутових точок і ліній полігону;

табличний процесор (Google Sheets) – фіксація вимірювань, обчислення похибок, статистичний аналіз.

Статистичне оцінювання похибок. Для кожного виміряного параметра  $X$  та  $i$ -го спостереження обчислюється абсолютне відхилення:

$$\Delta_i = X_{\text{експ}}^{(i)} - X_{\text{розр}}^{(i)}, \quad (20)$$

Відносна похибка для одного спостереження:

$$\delta_i = \frac{|\Delta_i|}{X_{\text{експ}}^{(i)}} \cdot 100\%. \quad (21)$$

За серією з  $n \geq 3$  повторень для одного режиму розраховуються:

середнє зміщення:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (22)$$

середня абсолютна відносна похибка:

$$Mape = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (23)$$

середньоквадратична похибка:

$$Rmse = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{експ}^i - X_{поз}^i)^2} \quad (24)$$

а також стандартне відхилення повторень:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X^i - \bar{X})^2} \quad (25)$$

Наукова гіпотеза вважається підтвердженою, якщо для більшості досліджуваних режимів одночасно виконуються такі умови:  $\bar{\Delta} \leq 15\%$  для площинних параметрів;  $|Bias|$  є статистично незначущим або компенсується стабільним корекційним коефіцієнтом; внутрішньосерійна варіація між повтореннями не виходить за межі; прийнятні для оперативного застосування.

### Результати

Метод коректно застосовується за таких умов: місцевість у межах кадру є горизонтальною; параметри поля зору камери відомі; висота польоту і кут підвісу фіксуються з прийнятною точністю; оптичні спотворення є незначущими або компенсовані внутрішньою обробкою камери. За цих умов формули (2) – (12) описують геометрію кадру аналітично.

Порівняння спрощеної формули  $S_{j,k} = S_0/9$  з уточненою  $S_{j,k} = A_j/3$  засвідчує, що при  $\gamma = -70^\circ$  і  $H = 15$  м площа дальнього поясу перевищує площу ближнього. Отже, спрощена схема може занижувати площу осередку, якщо він зосереджений у дальній зоні кадру. Уточнена схема за формулами (13) – (17) усуває цю систематичну похибку.

Натурна верифікація спрямована на встановлення відповідності між розрахунковими геометричними параметрами кадру та фактичними наземними розмірами, отриманими в реальному польовому експерименті. Перевірці підлягають: загальна площа охоплення; форма проєкції; ширини  $B_1$ ,  $B_2$ ; поздовжній розмір  $L$ ; площі поясів  $A_j$  і комірок  $S_{j,k}$ ; інтегральна похибка визначення площі умовного осередку НС.

Контрольний полігон задовольняє таким вимогам: відкрита рівна поверхня з перепадом висот у межах кадру не більше 0,1 м; відсутність об'єктів, що спотворюють проєкцію або

ускладнюють виконання польотів; площа, достатня для розміщення контрольної фігури найбільшого розміру (при  $\gamma = -70^\circ$ ,  $H = 15$  м:  $L \approx 35-40$  м,  $B_2 \approx 40-45$  м). Наземне маркування відтворює межі поясів і комірок сітки  $3 \times 3$ ; геодезичні вимірювання фіксують еталонні розміри до початку польотів.

План натурного експерименту охоплює дев'ять комбінацій режимів знімання:  $H = 5; 10; 15$  м та  $\gamma = -90^\circ; -80^\circ; -70^\circ$ . Для кожного режиму виконується не менше трьох повторень, загалом 27 знімальних сесій, що уможливило оцінювання внутрішньосерійної варіації за критерієм Грабса.

Керовані змінні висота  $H$  і кут підвісу  $\gamma$ . Контрольовані умови: швидкість вітру ( $< 5$  м/с), освітленість (без прямого засліплення), стан поверхні (суха, без снігового покриву), горизонтальне зміщення апарата відносно центру контрольної фігури ( $\leq 0,5$  м). Потенційні джерела похибок: барометрична невизначеність висоти ( $\pm 0,1$  м), мікрокрен і мікротангаж апарата ( $\leq 1^\circ$ ), неточність виставлення кута підвісу ( $\pm 1^\circ$ ), локальні нерівності полігону.

Послідовність одного знімального циклу: підготовка і перевірка полігону; контроль технічного стану БПЛА; зліт і стабілізація на заданій висоті; виставлення кута підвісу; фіксація телеметрії; серія з 3 замірів та кадрів; документування умов у польовому журналі; перехід до наступного режиму.

На етапі опрацювання для кожного знімка ідентифікуються контрольні точки та межі маркованої фігури, встановлюються фактичні лінійні параметри наземної проєкції через масштабування за контрольними точками, обчислюються площі поясів і комірок. Паралельно для тих самих значень  $H$  та  $\gamma$  розраховуються теоретичні значення  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $A_j$ ,  $S_{j,k}$  за формулами (2) – (17). Попарне зіставлення розрахункових і натурних значень формує масив похибок для статистичного аналізу.

У разі виявлення стійкого систематичного відхилення для певних режимів допускається введення режимозалежних корекційних коефіцієнтів:

$$B_{кор} = k_B(H, \alpha) \cdot B, \quad (26)$$

$$S_{кор} = k_S(H, \alpha) \cdot S. \quad (27)$$

На відміну від глобального калібрування, режимозалежні коефіцієнти точніше відображають фізичну природу похибок: для похилих режимів систематичне зміщення пов'язане насамперед із нелінійністю залежностей від  $\alpha$ , тоді як для вертикального режиму домінує барометрична похибка висоти.

### Обговорення

Наукова новизна запропонованої методики виявляється у кількох аспектах. Процедура верифікації аналітичної моделі виокремлено в самостійний дослідницький об'єкт і формалізовано не лише на рівні загальної площі кадру, а й на рівні зональної структури проєкції. Введено уточнену

математичну схему розрахунку площ окремих комірок сітки 3×3 при похилому зніманні (формули 13–17), що усуває концептуальну похибку рівновеликого зонування, притаманну попереднім спрощеним підходам. Розроблено систему кількісних критеріїв оцінювання придатності методу, яка поєднує геометричні параметри, статистичні характеристики похибок і процедуру режимозалежного калібрування.

Вибір порогу прийнятності  $\Delta \leq 15\%$  потребує окремого обґрунтування. Геодезичні методи забезпечують відносну похибку визначення площ на рівні 1–3%, проте потребують розгортання спеціального обладнання і часу від кількох годин до доби. Повне фотограмметричне опрацювання знімального маршруту БпЛА дає 5–10% при правильно виставленій GCP-мережі, але також не виключає тривалого камерального етапу. Метод, що верифікується, розрахований на отримання результату в полі впродовж 5–15 хв, тому поріг 15% є прийнятним компромісом між швидкістю та точністю. За умови підтвердження цього порогу метод займає нішу між суб'єктивною візуальною оцінкою (похибка 30–50%) і повноцінним фотограмметричним опрацюванням.

Щодо очікуваної поведінки моделі в різних режимах знімання: при  $\gamma = -90^\circ$  головним джерелом систематичної похибки є барометрична невизначеність висоти польоту, яка дає відносну похибку площі порядку  $2 \cdot \delta_H / H$ . При  $H = 5 \text{ м}$  і  $\delta_H = 0,1 \text{ м}$  це близько 4%, що є прийнятним. При  $\gamma = -70^\circ$  основним чинником стає похибка кута підвісу  $\delta_\gamma$ : через нелінійність залежності  $x_2$  від  $\alpha$  похибка дальньої ширини  $B_2$  може сягати 10–15% уже при  $\delta_\gamma = 1^\circ$ . Якщо аналіз невизначеності (формула 19 та числове варіювання) вкаже на систематичне перевищення порогу для похилих режимів, це стане підставою для обмеження рекомендованого діапазону кутів підвісу або введення корекційних коефіцієнтів (26) – (27).

Порівняння двох схем зонування показує, що уточнена ( $S_{j,k} = A_j/3$ ) дає систематично відмінні результати лише для похилих режимів. При  $\gamma = -90^\circ$  обидва підходи збігаються, оскільки  $A_j = S_0/3$  для прямокутної проекції. Це підтверджує коректність спрощення у вертикальному режимі і водночас доводить необхідність уточненої схеми для похилого. Натурна верифікація дозволить встановити, починаючи з якого кута нахилу різниця між схемами стає практично значною.

Перспективним розвитком методу є автоматизоване визначення коефіцієнтів  $\eta_{j,k}$  методами сегментації зображень або класифікації пікселів. Роботи з навігації та ідентифікації об'єктів із застосуванням штучного інтелекту [16] вказують на принципову можливість такого розширення. У поточній версії методу  $\eta_{j,k}$  визначається оператором, що вносить суб'єктивну складову; кількісна оцінка відповідної похибки є самостійним завданням подальших досліджень.

Методика є відтворюваною: вона детально регламентує умови польоту, вимоги до полігону, порядок вимірювань і розрахунків. Будь-яка

науково-дослідна установа або підрозділ цивільного захисту може відтворити випробування й порівняти результати. Стандартизація цієї процедури є необхідною умовою для включення методу до нормативно-методичних документів системи цивільного захисту України.

Основним обмеженням методу залишається припущення про горизонтальність місцевості в межах кадру. За істотно пересіченого рельєфу або наявності вертикальних об'єктів в осередку НС (будівлі, дерева, дамби) потрібно або вводити детальнішу корекцію на рельєф, або переходити до повноцінного фотограмметричного опрацювання. У таких ситуаціях результат методу слід розглядати виключно як первинну наближену оцінку, що підлягає обов'язковому уточненню.

### **Висновки**

Розроблено цілісну методику натурної верифікації аналітичного методу визначення площі осередку надзвичайної ситуації природного характеру за одиночним аерознімком із БпЛА DJI Mavic 3.

Сформульовано наукову гіпотезу, визначено контрольовані змінні та прийнятний критерій точності: середня абсолютна відносна похибка площинних параметрів  $\bar{\Delta} \leq 15\%$ , обґрунтований порівнянням з наявними методами визначення площ у задачах оперативного реагування.

Розроблено план натурного експерименту для дев'яти режимів знімання (27 сесій) та систему статистичного оцінювання за показниками *Mape*, *Rmse*, систематичного зміщення і варіації між повтореннями. За наявності систематичних відхилень передбачено введення режимозалежних корекційних коефіцієнтів  $k_B(H, \alpha)$  та  $k_S(H, \alpha)$ .

Практичним результатом роботи є науково обґрунтована відтворювана процедура, реалізація якої дозволить встановити оптимальні режими знімання для польового застосування методу, визначити межі його придатності та за потреби провести режимозалежне калібрування для апарата DJI Mavic 3.

### **Список використаних джерел**

- [1.] С. В. Мосов, В. В. Нероба та О. В. Селюков, "Особливості застосування безпілотного літального апарата в надзвичайних ситуаціях," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 1(9), с. 34–41, 2020. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.34-41>
- [2.] С. В. Мосов, В. В. Хижняк, А. О. Литовченко та Д. В. Ядченко, "Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації в сфері цивільного захисту України," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 2(12), с. 54–68, 2021. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68)
- [3.] Д. В. Ядченко, С. В. Мосов, А. О. Литовченко та В. В. Хижняк, "Особливості використання безпілотної авіації іноземними країнами для оцінювання збитків від надзвичайних ситуацій," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 1(11), с. 33–43, 2021. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1.33-43>
- [4.] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,"

- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 92, pp. 79–97, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [5.] G. Pajares, "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 4, pp. 281–329, 2015, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>.
- [6.] Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять, ДСТУ 4220-2003. Київ, Україна: Держстандарт України, 2003.
- [7.] P. R. Wolf, B. A. DeWitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [8.] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. Berlin, Germany: De Gruyter, 2014, <https://doi.org/10.1515/9783110302783>.
- [9.] DJI, "Mavic 3 Series – Specifications," DJI Official Website, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.dji.com/mavic-3/specs>
- [10.] О. Бас, О. Землянський, О. Мирошник та О. Авраменко, "Експериментальний метод виявлення та ідентифікування наземних мін безпілотними літальними апаратами," *Повітряна міць України*, № 1(6), с. 124–130, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-124-130>.
- [11.] О. О. Ковальов та І. М. Неклонський, "Модель руху безпілотного літального апарату в зоні надзвичайної ситуації," у *Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф.* Проблеми надзвичайних ситуацій – 2023, 2023, с. 239–240.
- [12.] А. Г. Ткачук та А. Р. Кравчук, "Автоматизована система виявлення пожеж на базі БПЛА з використанням технічного зору," у *Матеріали конф. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*, Житомир, Україна, 2023.
- [13.] О. В. Бас та М. М. Давиденко, "Проблемні питання розроблення БПЛА комплексів для розмінування території," у *Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених*, Черкаси, Україна: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023, с. 227–229.
- [14.] М. З. Лаврівський та А. П. Гавриш, "Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні та світі для виконання завдань цивільного захисту," *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 27(1), с. 151–153, 2017. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu\\_2017\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu_2017_27)
- [15.] М. М. Микійчук та Н. С. Зіганшин, "Аналіз методів керування безпілотними літальними апаратами," 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf>
- [16.] Д. В. Стасенко та В. С. Яковина, "Аналіз наявних методів і засобів удосконалення навігації БПЛА з використанням штучного інтелекту," *Scientific Bulletin of UNFU*, т. 33, № 4, с. 78–83, 2023, <https://doi.org/10.36930/40330411>.

<sup>1</sup>Oleh Bas (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-2401-9457>

<sup>1</sup>Oleh Myroshnyk (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-8951-9498>

<sup>2</sup>Oleksii Fedorov

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

<sup>1</sup>Serhii Kharchenko

<https://orcid.org/0009-0005-3071-966X>

<sup>1</sup>National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

<sup>2</sup>Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

## **METHODOLOGY FOR FIELD VERIFICATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE AREA OF A NATURAL EMERGENCY FOCUS BASED ON AERIAL IMAGERY FROM A DJI MAVIC 3 UAV**

*The article substantiates a methodology for the field verification of an analytical method for the onepamuve determination of the area of a natural emergency focus. The method is based on a geometric model of image projection onto a horizontal ground surface, taking into account the UAV flight altitude and the angle of inclination of the camera's optical axis. Unlike simplified approaches, the study details not only the formulas for determining the total area of the image projection, but also the mathematical scheme for calculating the areas of individual zones in the oblique imaging mode, when the projection acquires a trapezoidal shape. The research hypothesis is formulated, and the acceptance criteria and indicators for statistical evaluation of the results are defined. The requirements for the control test site, the experimental plan, the flight procedure, the results processing procedure, and the error calculation system are described. An approach is proposed for accounting for uncertainties in altitude, gimbal angle, and field-of-view parameters, as well as the procedure for introducing correction coefficients when systematic deviations are detected. The practical significance of the developed*

methodology lies in creating a reproducible procedure for testing the suitability of the analytical method for operational use by civil protection units directly in the emergency area.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, UAV, aerial imaging, emergency focus, affected area, field verification, geometric projection model, DJI Mavic 3, emergency response.*

### References

- [1.] S. V. Mosov, V. V. Neroba, and O. V. Sieliukov, "Features of the application of an unmanned aerial vehicle in emergency situations," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 1(9), pp. 34–41, 2020. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.34-41> (in Ukrainian)
- [2.] S. V. Mosov, V. V. Khyzhniak, A. O. Lytovchenko, and D. V. Yadchenko, "Classification, functions and tasks of unmanned aviation in the field of civil protection of Ukraine," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2(12), pp. 54–68, 2021. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68) (in Ukrainian)
- [3.] D. V. Yadchenko, S. V. Mosov, A. O. Lytovchenko, and V. V. Khyzhniak, "Features of the use of unmanned aviation by foreign countries to assess damage from emergencies," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 1(11), pp. 33–43, 2021. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1.33-43> (in Ukrainian)
- [4.] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp. 79–97, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [5.] G. Pajares, "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 4, pp. 281–329, 2015, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>.
- [6.] *Earth Remote Sensing from Space: Terms and Definitions*, DSTU 4220-2003. Kyiv, Ukraine: Derzhstandart of Ukraine, 2003. (in Ukrainian)
- [7.] P. R. Wolf, B. A. DeWitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [8.] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. Berlin, Germany: De Gruyter, 2014, <https://doi.org/10.1515/9783110302783>.
- [9.] DJI, "Mavic 3 Series – Specifications," DJI Official Website, 2022. [Online]. Available: <https://www.dji.com/mavic-3/specs>
- [10.] O. V. Bas, O. Zemlianskyi, O. Myroshnyk, and O. Avramenko, "Experimental method of detection and identification of land mines by unmanned aerial vehicles," *Air Power of Ukraine*, no. 1(6), pp. 124–130, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-124-130> (in Ukrainian)
- [11.] O. O. Kovaliov and I. M. Neklonskyi, "Model of movement of an unmanned aerial vehicle in an emergency zone," in *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. Problems of Emergencies - 2023*, 2023, pp. 239–240. (in Ukrainian)
- [12.] A. H. Tkachuk and A. R. Kravchuk, "Automated fire detection system based on UAV using technical vision," in *Proc. Conf. Computer Technologies: Innovations, Problems, Solutions, Zhytomyr, Ukraine, 2023*. (in Ukrainian)
- [13.] O. V. Bas and M. M. Davydenko, "Problematic issues of developing UAV complexes for territory demining," in *Proc. All-Ukrainian Sci. Pract. Conf. Science of Civil Protection as a Way of Formation of Young Scientists*, Cherkasy, Ukraine: CHIPB named after Heroes of Chernobyl NUCDU, 2023, pp. 227–229. (in Ukrainian)
- [14.] M. Z. Lavrivskyi and A. P. Havrys, "Development of unmanned aerial vehicles in Ukraine and the world to perform civil protection tasks," *Scientific Bulletin of UNFU*, no. 27(1), pp. 151–153, 2017. [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlit\\_2017\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlit_2017_27). (in Ukrainian)
- [15.] M. M. Mykyichuk and N. S. Zihanshyn, "Analysis of control methods of unmanned aerial vehicles," 2019. [Online]. Available: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf>. (in Ukrainian)
- [16.] D. V. Stasenko and V. S. Yakovyna, "Analysis of existing methods and means of improving UAV navigation using artificial intelligence," *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 33, no. 4, pp. 78–83, 2023, <https://doi.org/10.36930/40330411> (in Ukrainian)