

УДК 614.84

*С. В. Рудаков, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8263-0476)*  
*О. В. Миргород, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-5989-3435)*  
*О. В. Пирогов, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-0958-0801)*  
*А. В. Перезін, PhD, н.с. відділу (ORCID 0000-0003-2062-5537)*  
*Р. С. Мележик, PhD, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-6425-4147)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

## УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖНОЇ ОБСТАНОВКИ

Розглянуто процес моніторингу пожежної обстановки із застосуванням малорозмірних безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА). Об'єктом дослідження є процес дистанційного спостереження за осередками пожежі, а предметом – залежність ефективності виявлення об'єктів інтересу та безпеки польоту від висоти польоту БПЛА. Проблемаю дослідження є суперечність між необхідністю підвищення достовірності виявлення об'єктів інтересу та забезпеченням безпеки польоту БПЛА в умовах впливу небезпечних факторів пожежі, зокрема задимлення, теплового випромінювання та турбулентності повітря. Метою роботи є підвищення ефективності моніторингу пожежної обстановки шляхом визначення оптимальної висоти польоту БПЛА. У роботі розроблено критерій ефективності моніторингу, що базується на мінімізації сумарних втрат, які враховують як втрати, пов'язані з помилками виявлення об'єктів, так і втрати, обумовлені ризиком втрати БПЛА. Запропоновано математичні моделі спостережуваності об'єктів інтересу та безпеки польоту, що враховують змінні параметри пожежної обстановки, зокрема інтенсивність диму, характеристики підстильної поверхні та тепловий вплив. На основі цих моделей розроблено алгоритм визначення оптимальної висоти польоту БПЛА для окремих осередків пожежі з урахуванням локальних умов. Особливістю отриманих результатів є комплексне врахування взаємного впливу умов спостереження та факторів небезпеки польоту, а також адаптивний характер запропонованого підходу, що дозволяє визначати оптимальні параметри польоту в реальному часі для різних ділянок місцевості. За результатами моделювання встановлено, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність моніторингу в середньому на 15 %, а в окремих випадках: до 40–80 % порівняно з польотом на фіксованій висоті. Отримані результати можуть бути використані в системах підтримки прийняття рішень під час ліквідації пожеж.

**Ключові слова:** пожежна безпека, безпілотні літальні апарати, моніторинг пожеж, оптимальна висота польоту

### 1. Вступ

Авіаційний моніторинг наземної обстановки є важливою складовою системи реагування на надзвичайні ситуації. Особливої актуальності він набуває під час ліквідації пожеж, коли необхідно оперативно отримувати інформацію про масштаби поширення вогню, стан місцевості та наявність людей або техніки у небезпечній зоні.

Останніми роками значного поширення набуло використання БПЛА для виконання завдань спостереження та розвідки. Завдяки розвитку бортових сенсорів, обчислювальних систем та засобів передачі даних БПЛА можуть ефективно застосовуватися для моніторингу пожежної обстановки в режимі реального часу.

Особливо ефективними для таких задач є малорозмірні безпілотні літальні апарати мультироторного типу, які відзначаються високою маневреністю, можливістю зависання у повітрі та відносно низькою вартістю. Це дозволяє використовувати їх для детального обстеження територій, охоплених пожежею.

Разом з тим, виконання моніторингу в умовах пожежі супроводжується низькою складних факторів: задимленням атмосфери, турбулентністю повітряних по-

токів, тепловим впливом та обмеженою видимістю. Ці фактори суттєво впливають як на якість спостереження, так і на безпеку польоту БПЛА. Одним із ключових параметрів, що визначає ефективність моніторингу, є висота польоту безпілотного літального апарата. Зменшення висоти польоту дозволяє підвищити якість зображення та ймовірність виявлення об'єктів, однак водночас збільшує ризик втрати апарата через вплив небезпечних факторів пожежі.

Таким чином, виникає суперечність між необхідністю підвищення якості спостереження та забезпеченням безпеки польоту. Вирішення цієї суперечності можливе шляхом визначення оптимальної висоти польоту БПЛА, яка забезпечує максимальну ефективність моніторингу пожежної обстановки.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Питання застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу пожежної обстановки та ліквідації надзвичайних ситуацій активно досліджуються зарубіжними та вітчизняними науковцями. Використання безпілотних систем дозволяє оперативно отримувати інформацію про осередки пожежі, стан території, напрямок поширення вогню та інші параметри, необхідні для прийняття управлінських рішень під час проведення аварійно-рятувальних робіт.

Сучасні дослідження підтверджують ефективність застосування БПЛА для моніторингу пожеж, зокрема для виявлення осередків загоряння та відстеження їх динаміки [1–4]. Водночас у наведених роботах не розглянуто питання визначення оптимальної висоти польоту БПЛА з урахуванням впливу небезпечних факторів пожежі на ефективність моніторингу.

У роботах [5–6] розглянуто питання обґрунтування технічних характеристик засобів ведення розвідки пожеж із застосуванням безпілотних літальних апаратів. У цих дослідженнях показано, що використання БПЛА дозволяє значно підвищити ефективність спостереження за розвитком пожежної обстановки та зменшити ризики для особового складу підрозділів цивільного захисту.

Подальший розвиток ідеї застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту наведено у роботах [5–6], де проаналізовано сучасний стан і перспективи використання безпілотної авіації для виконання завдань моніторингу надзвичайних ситуацій, розвідки пожеж та оцінювання наслідків катастроф. У цих роботах підкреслюється важливість розвитку методів обробки інформації та підвищення ефективності використання безпілотних платформ. Однак зазначені дослідження не враховують вплив змінних умов пожежної обстановки на вибір параметрів польоту, зокрема висоти.

У міжнародних дослідженнях, зокрема у роботі [7], розглядаються підходи до прогнозування наслідків природних небезпек та використання інформаційних систем підтримки прийняття рішень під час реагування на надзвичайні ситуації. Отримані результати підтверджують важливість оперативного отримання достовірної інформації про розвиток небезпечних процесів. Разом з тим у роботі не розглядається задача оптимізації параметрів польоту БПЛА для підвищення ефективності моніторингу пожеж.

Питання планування польотів безпілотних літальних апаратів у складних умовах міського середовища досліджувалися у роботах [8–9]. У цих дослідженнях запропоновано методи планування траєкторій польоту БПЛА з урахуванням необхідності уникнення перешкод та забезпечення безпеки польотів у міській забудові. Отримані результати дозволяють підвищити надійність функціонування безпілотних систем під час виконання завдань моніторингу.

Крім того, у роботах [8–9] запропоновано методологію дослідження питань безпеки польотів групи безпілотних літальних апаратів у міському середовищі, що враховує особливості взаємодії апаратів між собою та з навколишнім середовищем. Зазначені підходи можуть бути використані під час розроблення систем моніторингу пожежної обстановки. При цьому не досліджено вплив висоти польоту на ефективність виявлення об'єктів в умовах пожежі. У роботі [10] розглядають застосування моделювання польотів безпілотних авіаційних систем для аналізу місця пожеж. Автори обґрунтовують ефективність використання математичних моделей для оптимізації маршрутів БПЛА та підвищення точності оцінки обстановки в умовах надзвичайних ситуацій. Водночас у роботі не розглядається питання комплексного врахування впливу умов спостереження та небезпечних факторів пожежі на вибір оптимальної висоти польоту БПЛА.

Теоретичні засади комп'ютерного моделювання систем і процесів висвітлюють у [11], зокрема методи обробки даних і побудови моделей. Представлені підходи формують основу для дослідження складних динамічних систем та можуть бути застосовані у сфері надзвичайних ситуацій. Разом з тим наведені теоретичні підходи не адаптовані до задач визначення оптимальних параметрів польоту БПЛА в умовах динамічно змінюваної пожежної обстановки.

Водночас аналіз наведених робіт показує, що більшість досліджень зосереджена на питаннях технічних характеристик безпілотних систем, планування траєкторій польоту та загальних аспектів їх використання у сфері цивільного захисту. При цьому недостатньо уваги приділяється визначенню оптимальних параметрів польоту безпілотних літальних апаратів під час моніторингу пожежної обстановки, зокрема вибору висоти польоту, яка забезпечує максимальну ефективність виявлення об'єктів за умов впливу небезпечних факторів пожежі.

Таким чином, існує потреба у розробленні методів і алгоритмів визначення оптимальних параметрів польоту безпілотних літальних апаратів, що дозволить підвищити ефективність моніторингу пожежної обстановки та покращити інформаційне забезпечення процесів управління під час ліквідації пожеж.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є підвищення ефективності моніторингу пожежної обстановки шляхом визначення оптимальної висоти польоту безпілотних літальних апаратів з урахуванням компромісу між достовірністю виявлення об'єктів інтересів та безпекою польоту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити критерій ефективності моніторингу пожежної обстановки, який враховує достовірність виявлення об'єктів та безпеку польоту безпілотних літальних апаратів;
- розробити математичні моделі спостережуваності об'єктів інтересу та безпеки польоту безпілотних літальних апаратів, а також алгоритм визначення оптимальної висоти польоту;
- провести моделювання та оцінити ефективність запропонованого підходу.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є процес моніторингу пожежної обстановки із застосуванням малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Предметом дослідження є закономірності впливу висоти польоту БПЛА на ефективність виявлення об'єктів інтересу та безпеку польоту в умовах пожежі.

Основна гіпотеза полягає в тому, що визначення оптимальної висоти польоту

БПЛА на основі критерію мінімізації сумарних втрат, які враховують достовірність виявлення об'єктів інтересу та безпеку польоту, дозволить підвищити ефективність моніторингу пожежної обстановки в умовах її динамічної зміни.

У роботі використано такі методи дослідження:

- методи математичного моделювання – для опису залежностей спостережуваності об'єктів та безпеки польоту від висоти;
- методи теорії ймовірностей і математичної статистики – для оцінювання ймовірності виявлення та помилок розпізнавання;
- методи комп'ютерного (статистичного) моделювання – для дослідження поведінки критерія ефективності в умовах змінних параметрів пожежної обстановки;
- методи оптимізації – для визначення екстремуму функції сумарних втрат і знаходження оптимальної висоти польоту БПЛА.

Моделювання проводилося шляхом варіювання параметрів пожежної обстановки (інтенсивності пожежі, задимленості, характеристик підстильної поверхні) та аналізу отриманих залежностей ефективності моніторингу.

### **5. Розробка критеріїв ефективності моніторингу пожежної обстановки**

Основним завданням моніторингу є пошук об'єктів інтересів, наприклад, автомобілів, які опинилися в зоні пожежі або в сильно задимленій місцевості. Результатом моніторингу є прийняте (або не прийняте) рішення про присутність або відсутність об'єкта інтересу в обстежуваній області моніторингу. Таке рішення приймається на основі виявлення прийому, обробки і аналізу інформації про ознаки об'єктів, які спостерігаються.

Моніторинг місцевості прийнято умовно розділяти на 4 етапи, кожен із яких має власні (локальні) параметри та критерії ефективності, а також обмеження, які впливають на загальну ефективність моніторингу.

Етап 1, Етап 4 – політ до n-ї області пошуку/політ до кінцевої точки маршруту. Ці етапи реалізуються на основі траєкторного управління БПЛА, завдання якого на даний час вже вирішено на належному рівні. Критерії траєкторного управління варіюються в залежності від завдання, враховуючи запас палива, продуктивність операції, задані вимоги та обмеження.

Етап 2 – обстеження області моніторингу. Залежно від умов моніторингу в процесі передпольотної підготовки обирається стратегія (тип сканування - суцільний, випадковий, адаптивний пошук) і визначається траєкторія польоту обстежуваної області пошуку. Цей етап визначає ефективність виконання етапу виявлення, так як отримані в процесі польоту зображення території, яка спостерігається, можуть містити перекриті (частково або повністю), затінені, зашумлені, мало контрастні зображення об'єкта інтересу або добре помітні зображення об'єктів.

Етап 3 – виявлення та ухвалення рішень про присутність об'єкта інтересу на місці обстеження. В процесі реалізації цього етапу розробляється аналіз прийнятих зображень та за результатами аналізу приймаються відповідні рішення.

Результатом виконання етапу є прийняті рішення:

- шуканий об'єкт виявлено;
- шуканий об'єкт не виявлено;
- рішення не прийнято.

При використанні статистичних методів прийняття рішень, можлива ймовірна оцінка помилкових рішень. Подібна оцінка може бути корисною при плануванні подальших дій, наприклад, продовженні або припиненні моніторингу.

Вихідними даними є:

- характеристики бортових систем спостереження (СС) (кут зору, фокусування та ін.);
- алфавіти класів об'єктів пошуку;
- словники ознак об'єктів.

Вихідні дані варіюються в залежності від способу виявлення об'єкта інтересу. Планування виконання кожного етапу включає:

- вибір (для даних умов) апаратних засобів спостереження та алгоритмів управління цими засобами;
- вибір програмних засобів: алгоритмів управління програмно-апаратними засобами, алгоритмів обробки зображень, виділення ознак, прийняття рішень;
- визначення складу баз даних, які містять алфавіти класів шуканих об'єктів інтересів та відповідні словники ознак.

В залежності від умов пошуку, зокрема, від наявності апріорних знань розташування об'єктів можуть використовуватися різні стратегії. Для формування управління пошуковими силами, які забезпечують необхідну ефективність, використовуються математичні моделі пошуку. Порівняння альтернативних варіантів здійснюється шляхом моделювання окремих приватних процесів і розрахунку потенційною ефективності їх виконання. Математичні моделі пошуку дозволяють порівнювати різні варіанти управління пошуковими силами та розглянути варіант з найкращими значеннями обраних критеріїв ефективності.

Описаний сценарій моніторингу використовується для моніторингу місцевості, однак, не застосовується для пожежної обстановки, умови спостереження в якій значно змінюються за часом. Відповідно, критерій ефективності для моніторингу пожежної обстановки має бути чутливим до змінним умов.

Для оцінки і передбачення ефективності (якості) пошуку об'єкта інтересу прийнято використовувати критерії пошуку, які повинні задовольняти наступним вимогам:

1. Відповідати зробленим розрахункам. Для оцінки ефективності до початку пошуку, доцільно брати ймовірнісну характеристику  $P_{об}$ , а під час пошуку або по його завершенню – продуктивну характеристику: загальний час пошуку  $t_{п}$ , середню кількість виявлених об'єктів пошуку.

2. Повинен підтримуватися зв'язок з постановкою завдання. Якщо постановка завдання припускає пошук на заданій площі з запасом по часу, то слід оцінювати  $P_{об}$  або об'єктів пошуку. Якщо ж пошук треба завершити як можна скоріше, то ефективність слід оцінити через  $t_{п}$ .

3. Критерій повинен володіти повнотою, тобто відповідати найбільш важливим обмеженням та умовам пошуку. Наприклад, при оцінці однієї необхідної ймовірності виявлення  $P_{об,необ}$  на попередньому етапі вирішення завдання пошуку для задоволення вимог кінцевого значення ймовірності виявлення  $P_{об} \geq P_{об,необ}$ , може знадобитися надмірно велика кількість пошукових сил. У цьому випадку в критерій слід увімкнути обмеження на мінімальну задану кількість пошукових сил та обмеження за часом.

4. Критерій повинен обиратися в кількісній формі та відображати фізичний сенс.

Одним з базових показників якості пошуку, що використовуються в критеріях, є ймовірність виявлення об'єкта інтересу, який залежить від дальності від системи спостереження до об'єкта  $P(D)$ , зображений на рис. 1. На рисунку представлений загальний вигляд залежності, конкретна форма даної кривої (кут нахилу,

протяжність тощо), яка зображена на графіку, та її положення щодо осі абсцис, який визначаються умовами спостереження під час проведення моніторингу.

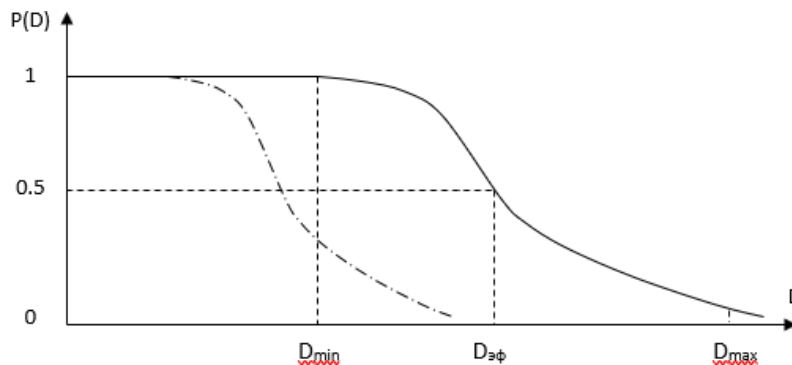


Рис. 1. Залежність ймовірності виявлення від дальності до об'єкта

При застосуванні даної моделі показника якості пошуку дальність моніторингу прийнято вважати ефективною, поки ймовірність виявлення об'єкта, яка розрахована за допомогою моделі ефективною дальністю, залишається вище порогового значення. Для даного прикладу порогова ймовірність дорівнює 0,5. Однак, подібна модель має обмежене застосування, бо не враховує умови спостереження та є достатньо наближеною. Якщо в конкретній пошуковій ситуації функція  $P(D)$  відома, то дана інформація дозволяє визначити параметри польоту БПЛА, які забезпечують максимізацію пошукових критеріїв ефективності. Дана модель виявлення не враховує можливі втрати, пов'язані з пропуском цілі та хибної тривоги, та зводиться до визначення ймовірності хоча б одного виявлення.

$$P_{m \geq 1} = 1 - P_{m=0} = 1 - e^{-y_{тп}}. \quad (1)$$

де  $y_{тп}$  - середня кількість виявлень за час пошуку  $t_{п}$ .

Складність застосування даного підходу полягає в тому, що для кожної ситуації умови різні і характеристики цих залежностей повинні визначатися індивідуально для кожних умов моніторингу.

Таким чином, головний недолік описаних класичних показників полягає в тому, що вони розраховані на постійні умови спостереження протягом виконання всієї операції, тому використання їх у явному вигляді для оцінки моніторингу пожежної обстановки є неможливим при динамічно змінюваних умовах пожежі.

Варіюючи в реальному часі дальністю до об'єкта, можна забезпечити задану ймовірність виявлення, а отже, і ефективність моніторингу. Однак, як було показано раніше на ймовірність виявлення у випадку моніторингу пожежної обстановки, впливає не тільки дистанція спостереження (дальність), а й спостережуваність об'єктів, що у свою чергу залежить від відносної яскравості та контрастності.

Для обчислення яскравості зображення у відповідності з рекомендаціями стандарту Держзв'язку України прийнято користуватися формулою:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B. \quad (2)$$

В даний час представлення колірних секторів з використанням sRGB-стандарту, простір кольорів суттєво відрізняється від National Television System Committee (NTSC), що видно з представлених на рис. 2 колірних спектрів обгово-

рюваних моделей. Трикутник використуваних кольорів став ширше і зміщений в бік, тобто точка білого теж зміщена, таким чином коефіцієнти для канонічної форми яскравості змінилися.

В роботі для розрахунку відносною яскравості зображення використовувалася наступна залежність:

$$Y_p = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B. \quad (3)$$

Для більш точного порівняння зміни яскравості візьмемо округлення коефіцієнтів до четвертого знаку, що в відповідність з міжнародним стандартом покриває 99 % споживчих завдань.

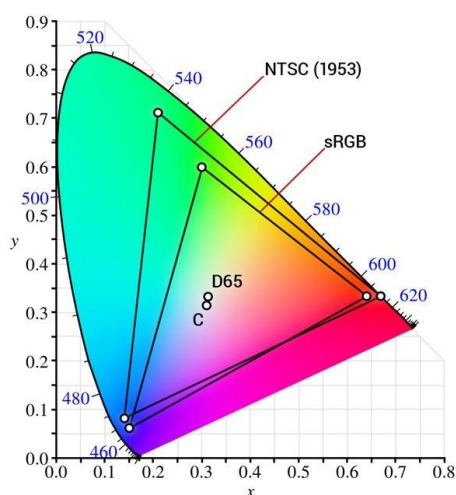


Рис. 2. Залежність ймовірності виявлення від дальності до об'єкта

Яскравість всього зображення розраховується за формулою:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \frac{N}{p} = (R_p + G_p + B_p), \quad (4)$$

де  $N$  – кількість пікселів на зображенні,  $p$  – номер пікселя, ( $p \in N$ ),  $Y$  – яскравість всього зображення.

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \frac{N}{p} Y_p. \quad (5)$$

де  $Y_p$  – яскравість  $p$ -го пікселя.

Загальноприйнятим поняттям контрасту є величина, яка дорівнює відношенню різниці максимальної та мінімальної яскравості пікселів до їх суми. Однак, більш точним критерієм яскравості контрастності є дисперсія яскравості пікселів зображення:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \frac{N}{p} (Y_p - Y)^2. \quad (6)$$

Більше універсальний безрозмірний критерій оцінки яскравості контрастності – відношення середньоквадратичного відхилення до максимально можливого значення яскравості:

$$C = \frac{2\sigma}{Y_{\max}}. \quad (7)$$

C змінюється в діапазоні (0,1). Значення 0 відповідає однотонному зображенню, значення 1 – максимально контрастному. Оптимальне значення контрастності залежить від типу об'єкта, представленого на зображенні.

Спостережуваність об'єктів також залежить від часткового або повного їх перекриття, факт настання якого визначається, коли відносна яскравість знижується нижче граничної. На цю обставину безумовно впливає і апаратна складова, що може бути критерієм вибору системи спостереження. Її чутливість – здатність перетворювати кванти світла на електричний сигнал, тобто нижня границя робочого діапазону освітленості.

Під «перекриттям» розуміється абсолютно густий дим, можливість побороти який виникає тільки при зниженні висоти польоту БПЛА, тобто зменшення кількості твердих частинок диму на прийнятому зображенні, і, як слідство, підвищенні контрастності. Яка в свою черга впливає на ймовірність правильного виявлення.

Таким чином, на даний момент існують методи оцінки ефективності моніторингу, такі, як загальна продуктивність, ймовірність перепустки цілі, час пошуку та інші, в моделі визначення яких входить ймовірність правильного виявлення.

Отже, справедливо рахувати дану ймовірність найбільш суттєвим показником якості моніторингу, так як вона повинна бути визначена при будь-кому виборі показника ефективності пошуку. Але при пожежній обстановці оцінка ефективності відрізняється. Якщо при незмінних умовах спостережування прийнято користуватися залежністю  $P(d)$ , то для моніторингу пожежної обстановки на даний момент відсутні моделі або методи оцінки ефективності, що в свою черга робить управління пошуковими засобами неефективним. Тому, пропонується підхід до оцінки та підвищення ефективності моніторингу, заснований на використанні евристичних моделей пожежної обстановки.

## 6. Формалізація прийнятого критерію ефективності

У даному розділі вирішується друге завдання дослідження, яке полягає у розробці математичних моделей спостережуваності об'єктів інтересу та безпеки польоту БПЛА, а також алгоритму визначення оптимальної висоти польоту.

В умовах пожежі через наявність полум'я та диму видимість об'єктів інтересу може погіршуватися в порівнянні з умовами спостереження території без пожежної обстановки. Залежно від інтенсивності диму, ефективна дальність спостереження змінюється, що призводить до змін ймовірності правильного виявлення або розпізнавання об'єктів. Необхідної ймовірності виявлення можна добитися, вибираючи певну висоту польоту БПЛА. Однак, при зниженні висоти польоту БПЛА буде більш інтенсивно піддаватися впливу теплових факторів і диму, що вплине на безпеку його польоту. Виникаюче протиріччя між вимагаємою спостережуваністю об'єктів та безпекою БПЛА необхідно вирішувати шляхом знаходження висоти, на якій буде забезпечений екстремум використовуваного критерію ефективності моніторингу.

Вибрані критерії ефективності визначають алгоритми управління пошуковими ресурсами. В теорії пошуку широко використовуються продуктивні критерії, які характеризують швидкість перегляду площі (області) пошуку в одиницю часу. Ймовірнісні критерії пошуку, зокрема, ймовірність правильного виявлення

або ймовірності помилок виявлення дозволяють оцінити можливості виконання достатньо ефективного пошуку на основі наявної апріорної інформації.

Подібні критерії можуть бути використані при оцінці ефективності моніторингу пожежної обстановки. Пропонується методика розрахунку оптимальної висоти польоту БПЛА, яка включає наступні етапи:

- вибір критерію ефективності моніторингу пожежної обстановки;
- оцінка критерію ефективності моніторингу від висоти польоту і пожежної обстановки;
- оцінка пожежної ситуації;
- селекція ділянок пожежі.

Визначення оптимальної висоти польоту для польоту кожною  $f$  області пожежної обстановки.

Етапи 1 і 2 включають передполітну підготовку, наступні етапи виконуються в реальному часі в процесі підльоту до місцевості, охопленої пожежою. Також слід відзначити, що етап 4 припускає перманентне виконання протягом всієї операції моніторингу.

В якості критерію оптимальності висоти польоту БПЛА обрані критерії, які ґрунтуються на відносних втратах:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_s + R_a, \\ R_s &= a_s (1 - W_s), \\ R_a &= a_a (1 - W_a) \end{aligned} \quad (8)$$

де  $R_{\Sigma}$  – загальні (сумарні) відносні втрати,  $R_s$  – відносні втрати, пов'язані з безпекою польоту,  $R_a$  – відносні втрати, пов'язані з помилкою виявлення,  $W_a$  – достовірність виявлення (спостереження),  $W_s$  – достовірність безпечного польоту БПЛА.

Значення  $W_a$  та  $W_s$  обчислюються за допомогою запропонованих у розділі 2 моделей спостережуваності об'єктів інтересу та безпеки польоту БПЛА. Дані моделі дозволяють враховувати різні умови пожежної обстановки для визначеної ділянки місцевості. Графіки цих моделей в залежності від висоти польоту БПЛА мають вигляд сигмоїд. На підставі запропонованих вище моделей і критеріїв зроблено моделювання розрахунку оптимальної з погляду мінімуму сумарних втрат висоти польоту над кожним осередком пожежі

$$\min R_{\Sigma} . \quad (9)$$

Наявність мінімуму функції загальних втрат (8) залежить від вибору коефіцієнтів ранжирування пріоритету втрат, які використовуються у формулах (9) та (10).

У випадку вибору коефіцієнтів ранжирування пріоритету втрат  $R_s < R_a$  рівни ми мінімум функції загальних втрат гарантовано. При нерівних в випадку монотонності функції, для конкретного осередка пожежі поставимося критеріями, що забезпечують максимум спостережуваності або безпеки польоту БПЛА, залежно від співвідношення коефіцієнтів, які визначають пріоритет втрат. Таким чином, для кожного осередка пожежі оптимальна висота польоту розраховується індивідуально.

Для осередків пожежі з монотонною функцією загальних втрат у разі вибору співвідношення коефіцієнтів ранжирування втрат  $R_s < R_a$  будемо використовувати критерій наступного виду:

$$\max W_a, \text{ при } W_s \geq W_s^0 . \quad (10)$$

У випадку співвідношення рангів втрат  $R_a < R_s$  і монотонності функції  $R_\Sigma$  розрахунок оптимальною висоти польоту відбувається з точки зору критерію:

$$\min R_s, \text{ при } W_a \geq W_a^o. \quad (11)$$

Підсумком роботи представленого алгоритму є оптимальні з точки зору обраного критерію висоти польоту для БПЛА над кожним з осередків пожежі. Маючи значення висоти, за допомогою моделей отримуємо рівень спостережуваності та безпеки БПЛА. А далі розрахуємо прогнозований рівень втрат.

Під втратами в процесі моніторингу пожежної обстановки можуть розумітися різні показники, такі як кількість апаратів, що вийшли з ладу, кількість невиявлених об'єктів інтересу (при достовірній апріорній інформації щодо їх наявності на досліджуваній площі), ступінь пошкодження апаратів і інше.

Втрати, які пов'язані зі спостереженням, обмежимо ймовірністю помилки виявлення деякого об'єкта інтересу. В такому випадку значення ймовірності набуває вигляд:

$$P_{lo}(h, \beta) = 1 - P_d(h, \beta, Y_o | X_o). \quad (12)$$

де  $P_{lo}(h)$  – ймовірність перепустки об'єкта інтересу (техніки, людей) на висоті  $h$ ;  $P_d(h, Y_o | X_o)$  – ймовірність правильного виявлення;  $\beta = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma n}\right)^2$  – відношення сигнал/шум.

Для знаходження залежності  $P_d(h, Y_o | X_o)$  від висоти польоту БПЛА необхідно:

- визначити модель спостережуваності;
- оцінити ймовірності перепустки об'єктів інтересів з допомогою статистичного моделювання процесу виявлення.

За допомогою методів статистичного моделювання була отримана наступна емпірична залежність ймовірності похибок виявлення

$$P_{lo}(h, \beta) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_f(h-h_f)}} \right] \left[ \frac{1}{1 + e^{-(\beta-\beta_0)}} \right]. \quad (13)$$

На рис. 3 представлено зміна контрастності одержуваного зображення із збільшенням висоти польоту БПЛА для різних рівнів  $\beta$ .

На рис. 4 представлені приклади зміни ймовірностей помилок перепустки об'єктів в залежності від висоти польоту БПЛА при різних  $\beta$ .

Задаючи  $\beta_0$  та обмеження на можливі значення  $\beta_t$  у спостережуваній області, позначимо  $\Delta\beta = \beta_t - \beta_0$ . Звідки втрати, що пов'язані зі спостереженнями, визначаються так:

$$R_a(h) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_f(h-h_f)}} \right] \left[ \frac{1}{1 + e^{-(\Delta\beta)}} \right]. \quad (14)$$

Отримана залежність показника якості  $R_a(h)$ , має назву втрати спостережуваності.

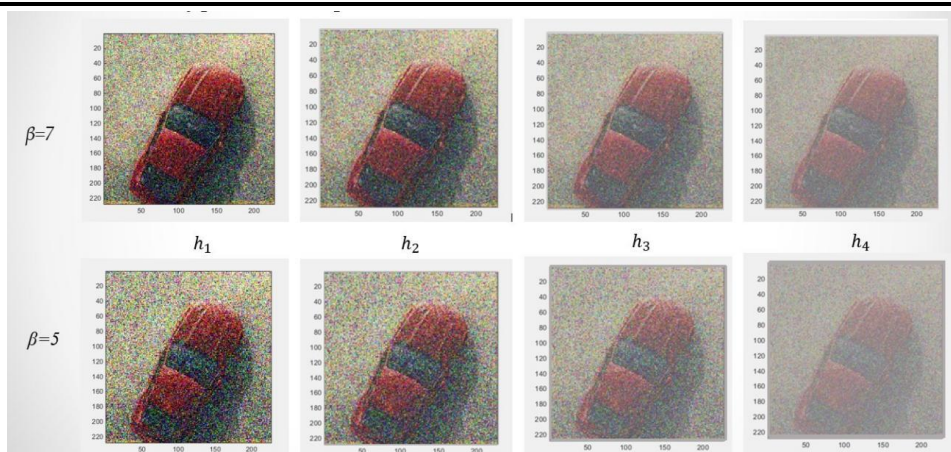


Рис. 3. Зміна контрастності в залежності від висоти польоту БПЛА і рівня шуму

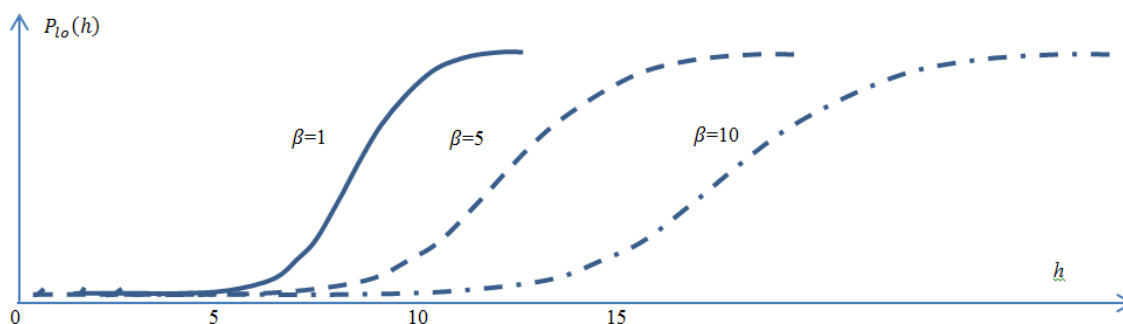


Рис. 4. Ймовірності перепустки об'єктів

Розглянемо втрати при моніторингу пожежної обстановки, які пов'язані з безпекою польоту БПЛА.

Будемо рахувати, що на низьких висотах польоту (наприклад, одиниці метрів) на безпеку польоту істотно впливають теплові впливи вогню та об'єкти, які розташовані за траєкторією польоту БПЛА (будівлі та споруди, дерева та чагарники).

Прийmemo, що відносна безпека БПЛА оцінюється достовірністю втрати (аварії) БПЛА та змінюється залежно від висоти польоту в діапазоні:  $0 \div 1$

$$R_s(h) = \left[ \frac{1}{1 + e^{-k_s(h-h_s)}} \right], \quad (15)$$

де  $k_s$  – емпіричний коефіцієнт, визначається з урахуванням інтенсивності вогню, розташування наземних об'єктів, умов польоту;  $h_s$  – висота польоту БПЛА, за якої відносна безпека польоту дорівнює 0,5, відповідно;  $s$  – індекс критерію безпеки польоту.

При  $R_s(h)=1$  БПЛА терпить аварію, що призводить до його руйнування, а при  $R_s(h) = 0$  умови польоту абсолютно безпечні.

Загальні втрати при моніторингу визначаються як:

$$R_{\Sigma}(h) = a_a R_a(h) + a_s R_s(h) = a_f \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_a(h-h_a)}} \right] \left[ \frac{1}{1 + e^{-\Delta\beta}} \right] + a_s \left[ \frac{1}{1 + e^{-k_s(h-h_s)}} \right]. \quad (16)$$

Мінімум даної функції визначає оптимальну висоту польоту БПЛА над конкретної областю  $f$  пожежної ситуації

$$h_{\text{opt}} = \arg \left[ \min R_{\Sigma} (h) \right].$$

В залежності від цільової задачі пошуку можлива варіативність критерію вибору висоти польоту БПЛА над територією. Умовами поставленого завдання можуть бути наступні варіанти: мінімізація втрат апаратів при обмеженні рівня достовірності виявлення або максимізація ймовірності виявлення при обмеженні безпеки польоту БПЛА, або мінімізація спільного рівня втрат. Нормовані вагові коефіцієнти  $a_a$  і  $a_s$  обираються експертним шляхом на підставі аналізу наявних пошукових ресурсів, а також значимості ОЗ.

### 7. Результати моделювання та оцінка ефективності підходу

У даному розділі вирішується третє завдання дослідження, яке полягає у проведенні моделювання та оцінюванні ефективності запропонованого підходу до визначення оптимальної висоти польоту безпілотних літальних апаратів в умовах пожежної обстановки. Для підтвердження працездатності представленого алгоритму було проведено експериментальне відпрацювання даного критерію. Було обрано шість осередків пожежі з індивідуальними характеристиками. Послідовно варіювалися емпіричні коефіцієнти моделей. Змінювалися характеристики підстилюючої поверхні, а також варіювалася вологість повітря, сила пожежі, густина і висота насаджень, висота полум'я і задимленості, інтенсивність диму. Ранги втрат поставимо рівними. Отримані результати представлені на рис. 5 – рис. 16.

$f$	1	2	3	4	5	6
$h_a^f$	15	17	19	21	23	25
$k_a^f$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$h_s^f$	12	12	12	12	12	12
$k_s^f$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Рис. 5. Вихідні дані: варіювання коефіцієнта  $h_a^f$

На даному сімействі кривих, які відображають вигляд залежності загальних втрат від висоти польоту апарату, помітні явно виражені мінімуми, які зумовлюють вибір оптимальних висот польоту для обстеження кожної з шести областей, для якої були розраховані коефіцієнти, наведені на рис. 13. Однак, варто відзначити, що при візуальному аналізі залежностей загальних втрат для областей з номерами 5 і 6 спостерігається також явний максимум, чого не виявлено в ході аналізу залежностей для решти областей пожежі. Даний «сплеск» залежності пояснюється умовами пожежної обстановки, які відображені в параметрах критерію. Коефіцієнти, які враховують вплив умов пожежі на висоту польоту БПЛА, та мають достатню близькість, а в випадку області 6 рівні значення.

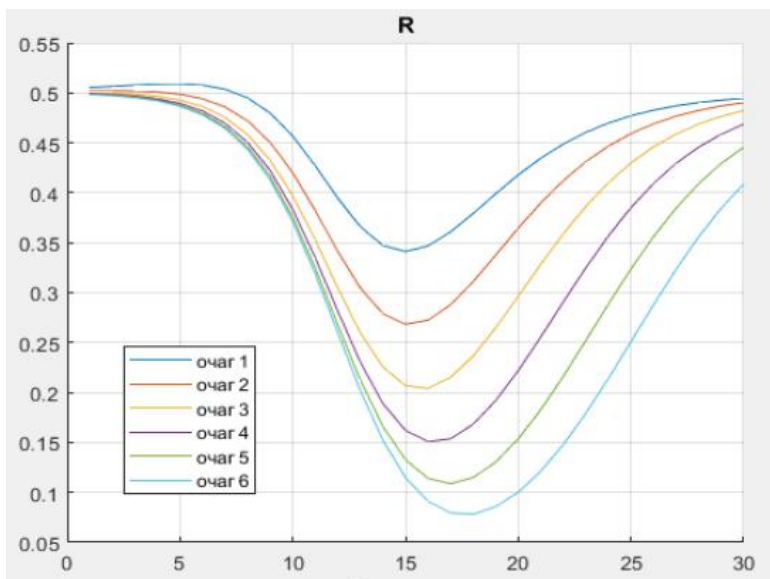


Рис. 6. Графік загальних втрат: варіювання коефіцієнта  $h_a^f$

f	1	2	3	4	5	6
$h_{opt}$	14.93	15.20	15.68	16.28	16.94	17.68

Рис. 7. Оптимальні висоти: варіювання коефіцієнта  $h_a^f$

f	1	2	3	4	5	6
$h_a^f$	23	23	23	23	23	23
$k_a^f$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$h_s^f$	12	12	12	12	12	12
$k_s^f$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Рис. 8. Вихідні дані: варіювання коефіцієнта  $k_a^f$

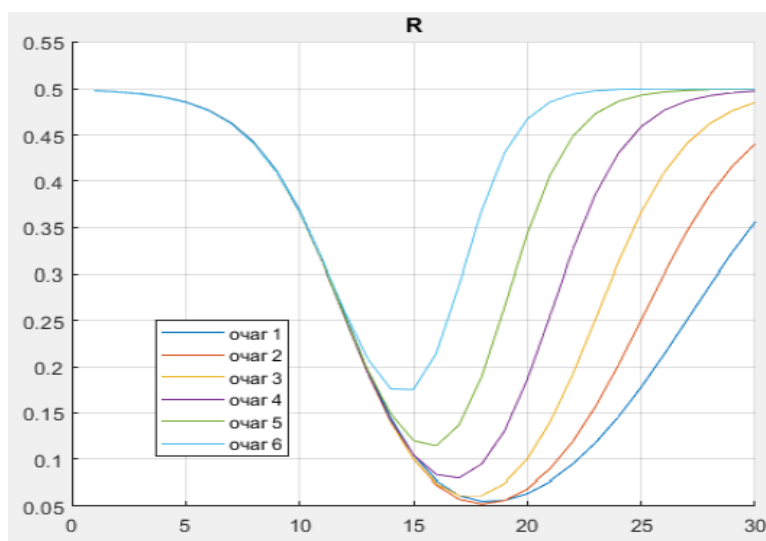


Рис. 9. Графік загальних втрат: варіювання коефіцієнта  $k_a^f$

f	1	2	3	4	5	6
$h_{opt}$	18.05	18.34	17.50	16.71	15.72	14.53

Рис. 10. Оптимальні висоти: варіювання коефіцієнта  $k_s^f$

$f$	1	2	3	4	5	6
$h_a^f$	23	23	23	23	23	23
$k_a^f$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$h_s^f$	13	15	17	19	21	23
$k_s^f$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Рис. 11. Вихідні дані: варіювання коефіцієнта  $k_s^f$

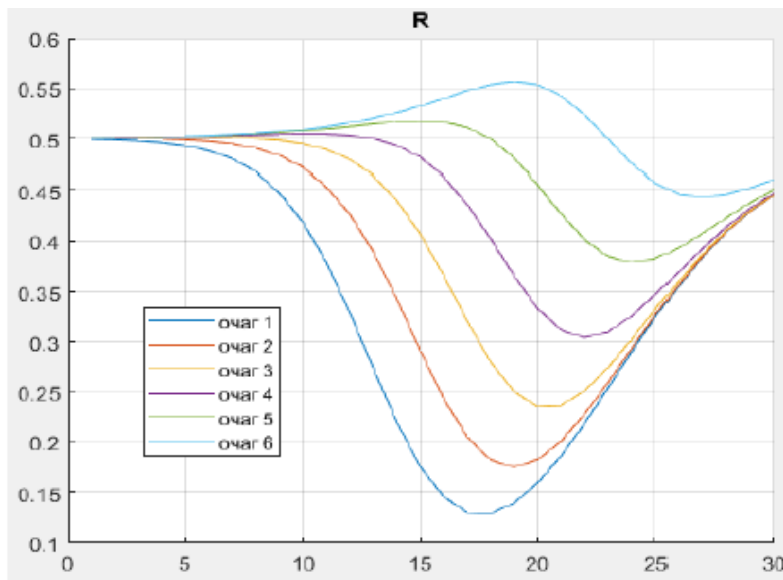


Рис. 12. Графік загальних втрат: варіювання коефіцієнта  $h_s^f$

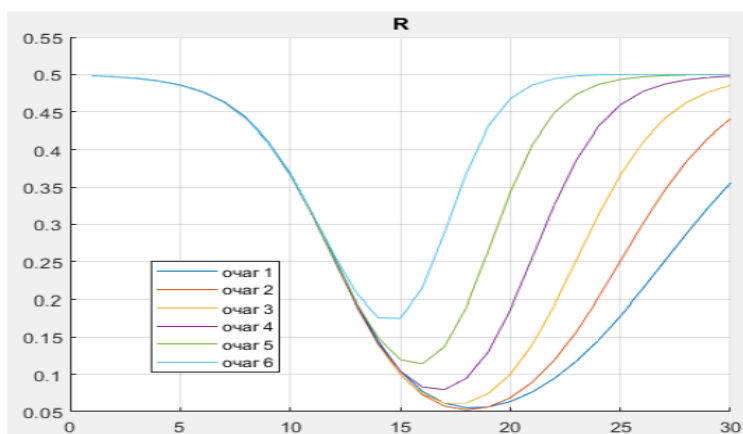
f	1	2	3	4	5	6
$h_{opt}$	17.60	18.97	20.42	22.05	24.06	26.92

Рис. 13. Оптимальні висоти: варіювання коефіцієнта  $h_s^f$

Отже, є висота польоту БПЛА, де втрати, пов'язані з впливом небезпечних чинників пожежі на безпеку польоту апарату, вже мають великі значення, однак, умови спостереження на даній висоті не забезпечують зниження рівня втрат по спостережуваності. Таким чином, на обговорюваній висоті спостерігається сплеск загальних втрат моніторингу пожежної обстановки, які враховуються в розробленому критерії.

На цих графіках зображені залежності рівня загальних втрат від висоти польоту БПЛА при варіаціях всіх складових критерію. Дані графіки показують адекватне реагування критерію на зміни умов пожежної обстановки, а, відповідно, умов, які впливають на безпеку польоту та спостережуваність. Висота, яка відповідає мінімуму цих втрат, вибирається в якості оптимальної.

$f$	1	2	3	4	5	6
$h_a^f$	23	23	23	23	23	23
$k_a^f$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$h_s^f$	12	12	12	12	12	12
$k_s^f$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8

Рис. 14. Вихідні дані: варіювання коефіцієнта  $k_s^f$ Рис. 15. Графік загальних втрат: варіювання коефіцієнта  $k_s^f$ 

$f$	1	2	3	4	5	6
$h_{opt}$	19.00	19.75	20.42	21.12	21.87	22.69

Рис. 16. Оптимальні висоти: варіювання коефіцієнта  $k_s^f$ 

Як впливає з поданих залежностей, що зміна щільності насаджень ( $h_a^f$ ) впливає лише на рівень втрат, оскільки сильна зміна висоти неможлива з урахуванням безпеки польоту. Однак, варіювання коефіцієнта  $h_s^f$ , який враховує обмеження висоти за безпекою, при інших рівних, дає зрушення по висоті. Інтенсивність пожежі  $k_s^f$  теж впливає на збільшення оптимальної висоти польоту.

Дані графіки показують адекватне реагування критерію на зміни умов пожежної обстановки, а відповідно і умов, які впливають на безпеку польоту та спостережуваність.

Адаптивність алгоритму полягає в тому, що відповідно з різними класами пожежної обстановки обстежувана місцевість поділяється на області, для яких призначається своя попередня висота польоту, згідно із запропонованим критерієм, а також в процесі моніторингу адаптивно обирається метод обробки зображення, який підвищує ефективність моніторингу за рахунок підвищення достовірності виявлення об'єкту інтересу, на основі аналізу гістограми отриманого зображення. Аналіз результатів серії проведених напівнатурних льотних експериментів показав, що при використанні запропонованого підходу до підвищення ефективності моніторингу пожежної обстановки в частині вибору оптимальної висоти польоту для кожної області середній приріст ефективності розпізнавання об'єкту інтересу складе 15 % щодо польоту на постійній висоті з урахуванням адаптації режиму обробки зображення в обох випадках. Разом з тим, використан-

ня адаптивного алгоритму забезпечує підвищення ефективності до 41 %, а на окремих зображеннях приріст склав до 85 %. Отримані результати дозволяють зробити висновок про ефективність запропонованого підходу і застосовності його для моніторингу пожежної обстановки з метою підвищення достовірності розпізнавання об'єкту інтересу, та, як слідство, підвищення ефективності всієї операції.

## **8. Обговорення результатів використання безпілотних літальних апаратів при моніторингу пожежної обстановки**

Отримані результати дослідження дозволяють вирішити науково-прикладну проблему, яка полягає у відсутності підходів до визначення оптимальних параметрів польоту безпілотних літальних апаратів з урахуванням змінних умов пожежної обстановки. Запропоновані у роботі рішення забезпечують усунення виявленої суперечності між необхідністю підвищення достовірності виявлення об'єктів інтересу та забезпеченням безпеки польоту БПЛА. Це досягається за рахунок використання критерію ефективності, що базується на мінімізації сумарних втрат, який одночасно враховує як втрати, пов'язані з помилками виявлення об'єктів, так і втрати, обумовлені ризиком втрати апарата. Такий підхід дозволяє перейти від використання окремих показників ефективності до комплексної оцінки, що є більш адекватною для умов пожежної обстановки, які характеризуються динамічністю та невизначеністю.

Переваги запропонованого підходу зумовлені рядом його особливостей. По-перше, розроблені моделі спостережуваності та безпеки польоту враховують вплив основних факторів пожежі, зокрема задимленості, теплового впливу та характеристик підстильної поверхні. По-друге, використання адаптивного алгоритму дозволяє визначати оптимальні параметри польоту індивідуально для окремих осередків пожежі, що забезпечує більш ефективне використання безпілотних систем у порівнянні з підходами, заснованими на фіксованих режимах польоту. По-третє, передбачено можливість адаптації методів обробки зображень у процесі моніторингу, що додатково підвищує достовірність виявлення об'єктів інтересу. На відміну від існуючих досліджень, у яких розглядаються переважно питання технічних характеристик БПЛА або планування траєкторій польоту, запропонований підхід забезпечує комплексне врахування умов спостереження та факторів небезпеки польоту при визначенні оптимальної висоти.

Це дозволяє підвищити ефективність моніторингу пожежної обстановки за рахунок узгодження вимог до якості спостереження та безпеки застосування безпілотних систем. Отримані результати пояснюються тим, що адаптивна зміна висоти польоту дозволяє підтримувати прийнятний рівень контрастності та спостережуваності об'єктів інтересу в умовах задимлення, водночас обмежуючи вплив небезпечних факторів пожежі на БПЛА. Таким чином забезпечується раціональний компроміс між ефективністю виявлення та безпекою польоту, що і визначає підвищення загальної ефективності моніторингу.

Подальший розвиток дослідження може бути спрямований на вдосконалення моделей спостережуваності з урахуванням спектральних характеристик сенсорів, інтеграцію запропонованого алгоритму в системи підтримки прийняття рішень, а також розширення підходу на випадок групового застосування безпілотних літальних апаратів. Крім того, перспективним є врахування додаткових факторів невизначеності, зокрема метеорологічних умов та обмежень зв'язку.

## 9. Висновки

1. У результаті вирішення першого завдання розроблено критерій ефективності моніторингу пожежної обстановки, який базується на мінімізації сумарних втрат. Запропонований критерій враховує дві ключові складові: втрати, пов'язані з помилками виявлення об'єктів інтересу, та втрати, обумовлені ризиком порушення безпеки польоту безпілотних літальних апаратів. На відміну від існуючих підходів, запропонований критерій дозволяє враховувати змінні умови пожежної обстановки та забезпечує кількісну оцінку ефективності моніторингу в динамічних умовах.

2. У межах другого завдання розроблено математичні моделі спостережуваності об'єктів інтересу та безпеки польоту безпілотних літальних апаратів, які враховують вплив висоти польоту, інтенсивності диму, теплових факторів та характеристик підстильної поверхні. На основі цих моделей запропоновано алгоритм визначення оптимальної висоти польоту безпілотних літальних апаратів, що забезпечує компроміс між якістю спостереження та безпекою польоту. Особливістю запропонованого підходу є його адаптивність, яка дозволяє визначати оптимальні параметри польоту для окремих осередків пожежі в реальному часі.

3. У результаті вирішення третього завдання проведено моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що використання алгоритму визначення оптимальної висоти польоту дозволяє підвищити ефективність моніторингу пожежної обстановки в середньому на 15 %, а в окремих випадках до 40–80 % порівняно з використанням фіксованої висоти польоту. Отримані результати свідчать про доцільність застосування розробленого підходу в системах підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту та ліквідації надзвичайних ситуацій.

## Література

1. Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios J. R., Ollero A. Cooperative fire detection using UAVs. *Robotics and Autonomous Systems*. 2005. doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570388
2. Restas A. Drone applications in disaster management. *Natural Hazards*. 2015. doi: 10.4236/wjet.2015.33c047
3. Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios J. R., Ollero A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. P. 533–548. doi: 10.1007/s10846-011-9560-x
4. Yuan C., Zhang Y. UAV-based forest fire detection and tracking. *ISPRS Journal*. 2017. doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152345
5. Мосов С. П., Станкевич С. А., Чумаченко С. М. Обґрунтування вимог до технічних характеристик засобів ведення розвідки пожеж із застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1(3). С. 57–65.
6. Мосов С. П. Ера безпілотної авіації в сфері цивільного захисту. *Пожежна та техногенна безпека*. 2020. № 11(86). С. 14–16.
7. Merz B. Impact forecasting to support emergency management of natural hazards. *Reviews of Geophysics*. 2020. P. 1–52. doi: 10.1029/2020RG000704
8. Коломійцев О. В., Рудаков І. С., Дмитрієв О. М., Кібальник В. М., Слободенюк Ю. В., Соловійов А. А., Пальчиков В. В., Дзюба І. В., Жуйков В. В., Чекунов В. В., Фесенко К. В. Удосконалений метод планування траєкторій польоту БПЛА. *Грааль науки*. 2025. № 56. С. 382–397. doi: 10.36074/grail-of-Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-19

science.19.09.2025.044

9. Коломійцев О. В., Рудаков І. С., Дмитрієв О. М. Методологія дослідження безпеки польотів груп БПЛА. Грааль науки. 2025. № 60. С. 602–614. doi: 10.36074/grail-of-science.26.12.2025.06

10. Рудаков С. В., Попов Д. О., Кулеба О. М. Моделювання польотів безпілотних авіаційних систем під час аналізу місця пожеж. Problems of Emergency Situations: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: НУЦЗУ. 2025. С. 127–128.

11. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О. М. Комп'ютерне моделювання систем і процесів. Методи обробки. Частина 2. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp%27yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t2/zm2.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/zm2.htm)

*S. Rudakov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*O. Myrgorod, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*P. Pirohov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*A. Perehin, PhD, Researcher of the Department*

*R. Melezhyk, PhD, Researcher of the Department*

*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

## IMPROVEMENT OF ALGORITHMS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF FIRE SITUATION MONITORING

The article examines the process of monitoring fire conditions using small unmanned aerial vehicles (hereinafter referred to as UAVs). The object of the study is the process of remote observation of fire hotspots, while the subject is the dependence of the efficiency of detecting objects of interest and flight safety on the UAV flight altitude. The research problem lies in the contradiction between the need to improve the reliability of object detection and ensuring UAV flight safety under the influence of hazardous fire-related factors, including smoke, thermal radiation, and air turbulence. The aim of the study is to improve the efficiency of fire monitoring by determining the optimal UAV flight altitude. The paper develops a monitoring efficiency criterion based on minimizing total losses, taking into account both losses associated with detection errors and losses caused by the risk of UAV loss. Mathematical models of object observability and flight safety are proposed, considering variable parameters of the fire environment, including smoke intensity, characteristics of the underlying surface, and thermal effects. Based on these models, an algorithm for determining the optimal UAV flight altitude for individual fire hotspots is developed, taking into account local conditions. A distinctive feature of the obtained results is the comprehensive consideration of the mutual influence of observation conditions and flight hazard factors, as well as the adaptive nature of the proposed approach, which enables the determination of optimal flight parameters in real time for different areas. According to the simulation results, the use of the proposed approach increases monitoring efficiency by an average of 15 %, and in some cases by up to 40–80 % compared to flights at a fixed altitude. The obtained results can be applied in decision support systems during fire response operations.

**Keywords:** fire safety, unmanned aerial vehicles, fire monitoring, optimal flight altitude

### References

1. Merino, L., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J. R., Ollero, A. (2005). Cooperative fire detection using UAVs. Robotics and Autonomous Systems. doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570388
2. Restas, A. (2015). Drone applications in disaster management. Natural Hazards. doi: 10.4236/wjet.2015.33c047
3. Merino, L., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J. R., Ollero, A. (2012). An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 533–548. doi: 10.1007/s10846-011-9560-x
4. Yuan, C., Zhang, Y. (2017). UAV-based forest fire detection and tracking.

ISPRS Journal. doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152345

5. Mosov, S. P., Stankevych, S. A., Chumachenko, S. M. (2017). Obgruntuvannia vymoh do tekhnichnykh kharakterystyk zasobiv vedennia rozvidky pozhezh iz zastosuvanniam bezpilotnykh litalnykh aparativ. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 1(3), 57–65.

6. Mosov, S. P. (2020). Era bezpilotnoi aviatsii v sferi tsyvilnoho zakhystu. Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka, 11(86), 14–16.

7. Merz, B. (2020). Impact forecasting to support emergency management of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 1–52. doi: 10.1029/2020RG000704

8. Kolomiytsev, O. V., Rudakov, I. S., Dmitriyev, O. M., Kibal'nyk, V. M., Slobodenyuk, YU. V., Solovyov, A. A., Pal'chykov, V. V., Dzyuba, I. V., Zhuykov, V. V., Chekunov, V. V., Fesenko, K. V. (2025). Udoskonalenyi metod planuvannia traiektorii polotu BPLA. *Hraal nauky*, 56, 382–397. doi: 10.36074/grail-of-science.19.09.2025.044

9. Kolomiytsev, O. V., Rudakov, I. S., Dmitriyev, O. M. (2025). Metodolohiia doslidzhennia bezpeky polotiv hrup BPLA. *Hraal nauky*, 60, 602–614. doi: 10.36074/grail-of-science.26.12.2025.06

10. Rudakov, S. V., Popov, D. O., Kuleba, O. M. (2025). Modeliuvannia polotiv bezpilotnykh aviatsiinykh system pid chas analizu mistsia pozhezh. *Problems of Emergency Situations*, 127–128.

11. Kvietnyi, R. N., Bohach, I. V., Boiko, O. R., Sofina, O. Yu., Shushura, O. M. Kompiuterne modeliuvannia system i protsesiv. *Metody obrobky. Chastyna 2*. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp%27yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t2/zm2..htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/zm2..htm)

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026